32.57
Г46
5802

П. А. ГИРИЛЛОВИЧ

ГИДРОМЕТРИЯ

ОНТИ • 1937

Репозитарий

Н. А. ГИРИЛЛОВИЧ

532.57
Г-46

ГИДРОМЕТРИЯ

ПРОВЕРЕНО 1948 г.

Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебника для втузов

А 326476
4 р. 75 к., переплет 1 р. 50 к.
580724
Электро-Машиностр. Инст. им. Ин
ГУУЗ НКТП СССР
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА
Ленинград, 92, ул. Стачек, 84
Переучет 1938 г.
ПЕРЕУЧЕТ 1959-62
РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА
БИБЛИОТЕКА Харьковского Политехнического ИНСТИТУТА
Инв. № 42713

ОНТИ • НКТП • СССР
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД 1937 МОСКВА

ПЕРЕУЧЕТ 1980 г.

[illegible]
С — 55 — 5 — 2

Рецензенты: проф. М. Д. Чертоусов
проф. В. М. Родевич

ТКК № 116 от 23/IX 1937 г.

В книге излагается курс гидрометрии применительно к программе гидротехнического факультета Ленинградского индустриального института, утвержденной ГУУЗ НКТП. Книга в основном является учебным пособием, но может также служить производственным руководством для инженеров и техников.

Ответств. редактор *А. М. Петерсон* Технич. редактор *Е. А. Мосевич*
Корректор *И. И. Поляков*

Сдано в набор 5/VIII 1937 г. Подписано к печати 27/IX 1937 г.
Формат бумаги 62 × 94 1/16 Бум. л. 10 1/4 Печ. л. 20,5 Тип. зн. в 1 бум. л. 99 550
Ленгорлит № 4473 Тираж 5000 Учетно-авт. л. 25,96 Заказ № 2284

2-я типография ОНТИ им. Евгении Соколовой. Ленинград, пр. Красных Командиров, 29.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5

Введение

§ 1. Сущность гидрометрии и ее задачи 6
§ 2. Краткие исторические сведения. Гидрометрические исследования в СССР 9

Глава I. Наблюдения над уровнем воды

§ 3. Водомерные посты 15
§ 4. Реечные посты 17
§ 5. Свайные посты 18
§ 6. Мостовые посты 20
§ 7. Автоматические посты без самопишущих приборов 21
§ 8. Автоматические саморегистрирующие посты 25
§ 9. Приборы для регистрации максимальных и минимальных уровней . . 28
§ 10. Приспособления для точного учета уровня 30
§ 11. Выбор места и типа поста 32
§ 12. Организация и производство наблюдений на посту 35
§ 13. Поверка, ремонт и перенос поста 37
§ 14. Первичная обработка водомерных наблюдений 37
§ 15. Статистическая обработка водомерных данных 41
§ 16. Характерные уровни 44
§ 17. Соответственные уровни 47

Глава II. Измерение скоростей течения

§ 18. Скорости течения в открытом русле 50
§ 19. Средняя скорость на вертикали 53
§ 20. Классификация приборов для измерения скоростей 62
§ 21. Поверхностные и глубинные поплавки 63
§ 22. Гидрометрические шесты и поплавки-интеграторы 65
§ 23. Измерение скоростей поплавками 68
§ 24. Профильные поплавки 70
§ 25. Вертушки на горизонтальной оси, их основные части и типы 71
§ 26. Вертушки Отта 75
§ 27. Вертушки других систем 82
§ 28. Вертушки на вертикальной оси 85
§ 29. Вертушки для определения направления течения 88
§ 30. Опускание вертушки на штанге и на тросе 92
§ 31. Принадлежности оборудования и уход за вертушкой 96
§ 32. Тарировка вертушек 99
§ 33. Обработка тарировочных данных. Уравнения тарировочных кривых . 105
§ 34. Определение коэфициентов уравнений тарировочных кривых 108
§ 35. Пользование тарировочными кривыми и уравнениями 112
§ 36. Методы измерения скоростей вертушкой 113
§ 37. Продолжительность измерений в отдельных точках 117
§ 38. Ватометр-тахиметр 120
§ 39. Динамометры 122

Глава III. Определение расходов воды

§ 40. Методы определения расходов. Объемный способ 130
§ 41. Определение расхода по скоростям и площади поперечного сечения . 133

§ 42. Выбор участка для определения расхода 136
§ 43. Установление направления створа и его закрепление 138
§ 44. Промеры глубин 141
§ 45. Обработка данных промеров 145
§ 46. Измерение расхода поплавками 147
§ 47. Вычисление расходов, измеренных поплавками 152
§ 48. Оборудование створа и измерение расхода вертушкой 157
§ 49. Методы вычисления расхода. Вычисление расхода по средним скоростям на вертикалях 164
§ 50. Другие методы вычисления расхода 171
§ 51. Приведение расхода к условному горизонту 174
§ 52. Источники ошибок и точность определения расходов по измеренным скоростям 177
§ 53. Определение расхода водяными дюймами, модулями и при помощи водослива 180
§ 54. Определение расхода по площади живого сечения и продольному уклону потока 185
§ 55. Определение расхода способами смешения и сравнительная точность методов 189
§ 56. Определение расхода воды в трубопроводах 196

Глава IV. **Установление связи между расходами и уровнями в открытом русле и вычисление стока**

§ 57. Кривая расходов и кривые площадей и средних скоростей живого сечения 202
§ 58. Методы установления кривой расходов. Графические методы 206
§ 59. Графические методы построения прямой линии расходов 210
§ 60. Установление кривой расходов графоаналитическими методами 216
§ 61. Аналитические методы установления кривой расходов 220
§ 62. Кривые расходов при неустойчивом русле 229
§ 63. Расходы при переменном уклоне 233
§ 64. Зимние расходы 239
§ 65. Пользование кривой расходов и обработка данных по ежедневным расходам 244
§ 66. Интегральная кривая стока 250

Глава V. **Учет наносов и специальные наблюдения**

§ 67. Общие сведения о наносах 257
§ 68. Приборы для наблюдений над взвешенными и растворенными наносами 260
§ 69. Производство наблюдений над взвешенными и растворенными наносами 263
§ 70. Обработка наблюдений над взвешенными и растворенными наносами . 267
§ 71. Методы непосредственного учета донных наносов 274
§ 72. Наблюдения над наносами путем изучения деформаций русла и донных отложений 279
§ 73. Механический анализ наносов и их химический состав 281
§ 74. Наблюдения над температурой и физико-химическими свойствами воды 285
§ 75. Наблюдения над зимним режимом 288

Перечень главнейших литературных источников . 295

Приложения

1. Технический список водомерного поста 298
2. Полевая книжка водомерного поста 302
3. Журнал водомерного поста 306
4. Годовая таблица ежедневных уровней 310
5. Бланк для записи и обработки измерения расхода воды поплавками . 311
6. Журнал определения расхода воды вертушкой 314
7. Бланк для записи и обработки измерения расхода воды вертушкой . 320
8. Годовая таблица ежедневных расходов воды 324
9. Журнал работ по учету наносов весовым способом 326
10. Журнал учета наносов объемным способом 328

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие составлено применительно к утвержденной программе курса гидрометрии гидротехнического факультета Ленинградского индустриального института. В качестве основного материала использованы литографированные издания моих записок, выпущенные Кубучом в 1932 и 1933 гг. и служившие учебным пособием для студентов Ленинградского гидротехнического института (влившегося в 1934 г. в Индустриальный институт). Этот материал подвергся значительной переработке и дополнениям. Так, заново написаны § 17 (соответственные уровни) и § 56 (определение расходов воды в трубопроводах) и сделаны существенные добавления и изменения в ряде других мест книги (§§ 2, 8, 19, 24, 26, 27, 29, 32, 33, 39, 40, 48, 49, 53, 55, 58, 59, 60, 64, 71, 74).

Главное внимание при составлении книги мной уделялось логической стройности и ясности изложения, каковые условия я считал совершенно необходимыми для учебного пособия. В то же время я старался изложить предмет на уровне современных знаний и последних достижений технической мысли.

Имея в виду возможность для студентов углубить свои знания, я привел ряд исторических сведений и дополнительных материалов, выходящих за пределы программы. Эта часть книги набрана петитом и таким образом не нарушает хода изложения основного подлежащего усвоению материала. Здесь я привел также некоторые мало употребительные конструкции и методы, полагая, что знакомство с ними полезно для лиц, желающих внести свои предложения и усовершенствования.

Так как обработка гидрометрических данных очень часто заставляет инженера иметь дело со старыми материалами или знакомиться с материалами заграничными, то я считал полезным также дать некоторые иллюстрации в саженных и футовых мерах. Все основные примеры даны в метрических мерах.

В виду наличия в учебных планах гидротехнического факультета ЛИИ отдельного курса гидрогеологии, я ограничил содержание настоящей книги гидрометрией поверхностных вод, главным образом текучих вод суши. На вопросах, излагаемых в других смежных дисциплинах (геодезия, гидравлика, гидротехнические изыскания), я останавливался вскользь, так как здесь некоторое небольшое перекрытие являлось неизбежным.

Считаю приятным долгом выразить свою благодарность всем лицам, оказавшим мне помощь ценными советами и указаниями.

Н. Гириллович

Ленинград, июль 1937 г.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Сущность гидрометрии и ее задачи. Слово *«гидрометрия»* происходит от сочетания двух греческих слов: «вода» и «мерить» и может быть переведено как *водомерие* или *водомерное дело*, хотя последний термин обычно применяется у нас для обозначения только наблюдений над уровнем воды (*«водомерные наблюдения»*), а под *«гидрометрическими работами»* часто подразумеваются только работы по измерению скоростей течения и определению расходов воды потоков.

Гидрометрия в широком смысле слова представляет *измерительную часть гидрологии* — обширной науки, изучающей происхождение, жизнь и деятельность воды на земном шаре во всех трех его оболочках: в атмосфере, на поверхности земли и в земной коре, — и разрабатывает и устанавливает *способы количественного определения* различных элементов, характеризующих жизнь воды в природе. К последним относятся осадки, испарение, уровень надземных и подземных вод, скорости течения и расходы воды в реках и водоносных пластах земной коры, температура воды, твердые вещества, передвигаемые водой («наносы»), и пр.

Другая часть гидрологии — описательная — носит общее название *гидрографии* и занимается описанием отдельных водных объектов — морей, рек, озер, ледников и пр., основываясь на данных как произведенных с этой целью геодезических работ — съемок, промеров глубин и нивелировок, в результате которых составляются карты, продольные профили рек, устанавливаются границы бассейнов и пр., — так и работ гидрометрических вообще. Указанные геодезические работы объединяются общим названием *гидрографических работ*, хотя в понятие последних иногда включаются не только геодезические работы, но и гидрометрические (например, за границей, у нас в морском деле).

Гидрометрия и гидрография дают гидрологии тот основной материал, изучая который она делает свои выводы и обобщения.

Сообразно с делением гидрологии по видам вод, являющимся объектами изучения, гидрометрия могла бы быть также подразделена на следующие отделы:

I. Гидрометрия атмосферных вод или *гидрометеорометрия (гидрометеорология* — наука о воде в атмосфере).

II. Гидрометрия поверхностных вод:

1) океанов и морей — *океанометрия (океанология* — наука об океанах и морях):

2) вод суши:

а) текучих — *потамометрия (потамология* — наука о реках) и *гляциометрия (гляциология* — наука о ледниках).

б) скопившихся в виде озер и болот — *лимнометрия (лимнология* — наука об озерах) и *тельматометрия (тельматология* — учение о болотах).

III. Гидрометрия подземных вод — геогидрометрия (*гидрогеология* — наука о подземных водах).

При современном состоянии гидрологии, которая сама сравнительно недавно выделилась из геофизики в самостоятельную науку, не все перечисленные отделы гидрометрии развились настолько, чтобы отделиться от соответствующих гидрологических дисциплин.

Так, гидрометеорометрия обычно излагается в курсах метеорологии или гидрометеорологии, океанометрия — в курсах океанологии (океанографии). Прочие виды гидрометрии, касающиеся вод суши (исключая узко специальную гляциометрию) и представляющие наибольший интерес с точки зрения гидротехники, обычно выделяются в самостоятельную часть гидрологии — гидрометрию поверхностных и подземных вод или только поверхностных вод.

Гидрометрия подземных вод, по сравнению с гидрометрией поверхностных вод, характеризуется значительно меньшим количеством объектов и методов измерений и входит в курс гидрогеологии. Поэтому дальнейшее изложение будет посвящено *гидрометрии поверхностных вод суши*, главным образом речной гидрометрии (потамометрии), знакомство с которой особенно необходимо для инженера-гидротехника. Методы последней в некоторых отношениях применимы также к морям и озерам — например, в части производства наблюдений над колебаниями уровня воды.

Развитие и усовершенствование методов гидрометрии неразрывно связано с развитием гидротехники и ее потребностями (мелиорация, водоснабжение, использование водной энергии, водные пути и пр.). Всякое гидротехническое сооружение вносит изменения в естественную жизнь вод и само подвергается их действию. Оно должно быть приспособлено строителем к жизни вод, рационально и целесообразно устроено, а для этого необходимо предварительно иметь ясное представление о том, как живет вода. Необходимо установить различные численные характеристики этой жизни, проследить их изменение во времени и пространстве и увязать между собой, т. е. прибегнуть к помощи гидрометрии.

Вода на земном шаре, находясь в различных состояниях (жидком, газообразном и твердом), постоянно переходит из одного вида в другой, перемещаясь в пределах всех трех земных оболочек как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Изменение метеорологических условий влечет изменение количества воды, притекающей в реки, озера и моря, изменение запасов грунтовых вод, испарения, температуры воды и пр. С изменением расхода воды в реке изменяется высота уровня воды, продольный уклон водной поверхности, скорости течения и их распределение и другие элементы. Степень изменчивости всех этих элементов и периодичность изменений характеризуют *режим вод*.

Если рассматривать только *механический* режим, отделяя его от

теплового, то во всем многообразии элементов режима реки можно выделить два основных или первичных элемента, взаимодействие которых определяет все остальные. Это — переменный *расход воды*, обусловливаемый питанием реки, и относительно мало изменяющееся *ложе* или *русло реки*. Высота уровня воды, скорости течения, уклон водной поверхности, количество передвигаемых рекой твердых веществ и пр. являются следствием расхода и состояния русла, т. е. производными, вторичными элементами.

Тепловой режим характеризуется колебаниями и распределением температуры воды, условиями образования ледяного покрова, его толщиной и пр. Мы совершенно не будем касаться биологического режима вод, являющегося предметом изучения *гидробиологии*.

Таким образом, гидрометрия имеет задачей количественное определение различных элементов механического и теплового режима вод, с целью выяснения их изменчивости, взаимной связи и периодичности для надежного обоснования водохозяйственных и гидротехнических расчетов, а также выводов и обобщений гидрологии.

Как будет видно в дальнейшем, измерение расхода воды в потоке обычно связывается с определением размеров и формы поперечного сечения русла и представляет довольно сложную и дорого стоящую операцию. Между тем, высота уровня воды определяется гораздо проще и при соблюдении надлежащих условий может быть поставлена в прямую и хорошо выраженную связь с расходами. Поэтому чисто практические соображения заставляют производить непрерывные измерения высоты уровня и периодические измерения расхода, с тем, чтобы, установив связь расходов и уровней, так называемую «*кривую расходов*», путем последующего пересчета уровней получить картину непрерывного изменения расходов во времени. Но и помимо этого измерение уровней важно и необходимо само по себе при решении большинства задач гидротехники (определение напора на гидроустановках, возможность отвода воды в оросительные каналы, обеспечение судоходных глубин и т. д.).

То обстоятельство, что режим рек (как и всех наземных вод вообще) тесно связан с метеорологическими условиями и климатом, порождает необходимость, для выяснения его, производства *длительных* и *непрерывных гидрометрических наблюдений*, что отличает последние от других видов исследований, предпринимаемых для обоснования гидротехнических расчетов, например от топографических и геологических. Если в режиме вод мы отчетливо наблюдаем годовую периодичность, то все же из года в год метеорологические условия, а с ними и режим вод, изменяются, колеблясь около некоторых средних значений, зависящих от климата местности. Поэтому для полного выяснения режима вод и его *многолетних характеристик* (средних и предельных величин) были бы необходимы весьма продолжительные гидрометрические наблюдения, длительность которых должна соответствовать так называемым *климатическим периодам* или циклам, охватывающим все возможные изменения режима. Последние, по некоторым исследованиям, имеют продолжительность около 35 лет (периоды *Брюкнера*) или 11 лет (периоды солнечных пятен). При отсутствии столь длительных наблюдений или невозможности производства их из-за срочности запросов жизни и гидротехнического

строительства, приходится часто поневоле ограничиваться значительно меньшей продолжительностью — порядка нескольких лет или даже одного года. В этом случае связь между элементами режима вод (например, расходами) и метеорологическими условиями, исследуемая гидрологией, позволяет приближенно очертить режим вод за более длительный период, так как систематические метеорологические наблюдения обычно имеются за несколько десятков лет.

В соответствии с практическими требованиями, предъявляемыми гидротехникой к гидрометрии, и ранее высказанными соображениями, в дальнейшем будут рассмотрены следующие основные вопросы гидрометрии поверхностных вод суши:

1) наблюдения над уровнем воды,
2) измерение скоростей течения,
3) определение расходов воды,
4) установление связи расходов и уровней и вычисление стока,
5) наблюдения над передвигаемыми водой твердыми веществами (наносами) и некоторые специальные наблюдения (над тепловым режимом и другие).

Однако, прежде чем перейти к рассмотрению этих наблюдений, предварительно коснемся вкратце истории развития гидрометрии вообще и гидрометрических исследований в СССР в частности.

§ 2. Краткие исторические сведения. Гидрометрические исследования в СССР.

Еще в Египте, около 4000 лет назад, как обнаружила французская экспедиция времен Наполеона I, при некоторых храмах существовали галереи, сообщавшиеся с водами Нила, где делались отметки стояния уровня воды, за которым наблюдали жрецы, предсказывавшие урожай. На Верхнем Ниле были найдены высеченные в береговых скалах относящиеся к тому же периоду деления, по которым можно было отсчитывать высоту стояния уровня воды в реке. Другие подобные устройства более позднего происхождения обнаружены в Египте у Ассуана, древнего Каира и в других странах. На некоторых реках Европы найдены давние метки высоких и низких вод, сделанные на прибрежных камнях. Установлено, что разного рода *водомеры*, предназначенные для распределения оросительной воды, применялись в средние века на ирригационных системах в Северной Италии и Средней Азии.

Леонардо да Винчи (XV век) первый применил двойной поплавок для измерения скорости течения, а в 1628 г. ученик Галилея *Кастелли* выпустил первую книгу по гидрометрии. В 1646 г. иезуит *Кавво* ввел в употребление *«гидрометрический шест»* для измерения средней скорости сразу по всей глубине потока; в 1732 г. француз *Пито* предложил свою *«трубку»* для измерения скоростей течения. С той же целью в 1790 г. немец *Вольтман* соорудил первую *«гидрометрическую вертушку»*, подвергшуюся в дальнейшем разным усовершенствованиям и являющуюся наиболее распространенным прибором для измерения скоростей в настоящее время. В отношении измерения скоростей течения и расходов рек гидрометрия сделала особенно большие успехи со времени работ *Гарлахера* на Эльбе и Дунае в 70-х и в 80-х годах прошлого столетия.

Производство систематических наблюдений над колебаниями уровня вод было предпринято в Западной Европе с начала минувшего века. Организация правильной гидрометрической *«Службы оповещения паводков и наводнений»* во Франции относится к 50-м годам, а затем стали учреждаться постоянные *гидрографические* или под другим названием *(гидрометрические)* службы в Австрии, Швейцарии, Италии, Венгрии, Германии, Швеции, США, Японии и в других странах.

В царской России систематические водомерные наблюдения над уровнем на так называемых *водомерных постах* начались с 1874 г. До этого наблюдения производились без определенного плана, исключительно с судоходными целями: посты располагались на перекатах рек и не действовали в зимнее время. Появление первой водомерной инструкции относится к 1858 г., хотя еще значительно

раньше, при исследованиях соединительных водных путей в конце XVIII века, уже производились отдельные, связанные с изысканиями, гидрометрические наблюдения.

В 1874 г. при департаменте шоссейных и водных сообщений Министерства путей сообщения была учреждена особая *«Навигационно-описная комиссия»*, действовавшая в течение 20 лет и положившая начало планомерному изучению русских рек. Работы комиссии составили эпоху в речной гидрографии России. Ею было основано около 500 водомерных постов, причем «описными партиями» на изучаемых реках производились также отдельные определения скоростей течения и расходов воды. При работах по описанию р. Волги в 1880—1888 гг. определение скоростей течения и расходов воды велось на нескольких временных *«гидрометрических станциях»* на самой Волге и на некоторых ее притоках.

В результате работ комиссии и последующих исследований появились *«Перечни внутренних водных путей»* Европейской и Азиатской России, устанавливающие общее протяжение судоходных и сплавных рек государства — около 290 000 *км*. Рек, способных служить в большей или меньшей степени для судоходства и сплава, по одной Европейской России считалось до 270 000 *км*, полное же протяжение русских рек, включая и Азиатскую Россию, достигало чрезвычайной цифры, которая и в настоящее время не может быть точно установлена. По данным *Родевича*, длина всех рек Союза должна быть не меньше 500 000 *км*.

Деятельность описных партий продолжалась и после прекращения существования Навигационно-описной комиссии, направляемая *Управлением водных путей*, постепенно охватывал, в первую очередь, все крупные и судоходные реки. Число водомерных постов неуклонно возрастало, достигнув максимума (845 постов) в 1917 г. Посты Министерства путей сообщения делились на два разряда: I разряда, действующие круглый год, и II разряда, на которых наблюдения производились только в течение навигации. К 1923 г. число исправно действующих водомерных постов НКПС уменьшилось почти на половину, после чего снова начало возрастать.

Исследования рек после 1904 г. стали производиться более полно, обязательно включая разработку гидрометрических данных (наблюдения над уровнями и определение расходов воды), для чего были изданы подробные инструкции, в частности специально для гидрометрических работ («Инструкции для исследования водных путей, ч. III», 1914 г.). В период 1901—1915 гг. разновременно работали постоянные и временные гидрометрические станции на Волге (Дубовская у Царицына, Тетюшская, Вязовская у Свияжска, Ярославская, у Верхневолжского бейшлота), Неве, Мете, Днепре, Суне и на реках Сибири (Амуре, Шилке, Зее, Туре, Тоболе и Енисее). На Оке, Сев. Донце, Дону и Шексне расходы определялись в связи с проектами и осуществлением шлюзования этих рек.

В 1912 г. при Управлении водных путей была открыта особая гидрометрическая организация, ведающая 30 станциями, действовавшими в период 1912—1917 гг. Кроме наблюдений над уровнем и измерения скоростей и расходов воды, Управлением водных путей производились также специальные исследования по изучению движения наносов (на Днепре и Волге) и зимнего режима.

Результаты исследований рек Министерством путей сообщения печатались в *«Материалах для описания русских рек и улучшения их судоходных условий»* (издано 74 выпуска) и в других изданиях, а обработанные наблюдения водомерных постов изданы в 10 томах под названием: *«Сведения об уровне воды на внутренних водных путях России по наблюдениям на водомерных постах»* — и охватывают 30-летний период 1881—1910 гг.[1] Все эти труды, обнимающие большинство крупных русских рек, послужили основанием не только для гидрографии и гидрометрии последних, но и для гидрологии СССР вообще.

Наряду с деятельностью Министерства путей сообщения развитие гидрометрических работ в России шло и по другой линии — по *Министерству земледелия и государственных имуществ*. В этом направлении начало гидрометрических работ было положено «Западной экспедицией по осушению болот» *Жилинского*, обследовавшей в течение 25 лет (1873—1898 гг.) Полесье и бассейн р. Припяти. Затем тем же ведомством под руководством того же Жилинского была организована «Экспедиция по орошению на юге России и на Кавказе», работавшая с 1880 по

[1] Бассейны Балтийского и Белого морей — тт. I, IV и VIII, Каспийского — тт. II, V и IX, Черного и Азовского — тт. III, VI и X, и Сев. Ледовитого и Тихого океанов — т. VII.

1891 г. и выполнившая ценные метеорологические и гидрометрические исследования в б. губерниях Екатеринославской, Таврической, Саратовской, Астраханской и Самарской, в Калмыцкой степи, б. Уральской и Семиреченской областях, в бассейне р. Кумы и в Закавказье.

Кроме того, гидрометрические работы в ряду прочих производились экспедициями: Аму-Дарьинской (1873 г.), Арало-Каспийской (1874 г.), Кумо-Манычской (1878—1879 гг.), экспедицией по исследованию старых русел Аму-Дарьи между Аральским и Каспийским морями (1893 г.) и экспедицией по обследованию низовьев р. Терека (1901—1903 гг.). Богатые гидрометрические и гидрологические данные были получены «Экспедицией по исследованию источников главнейших рек Европейской России» (1894—1903 гг.), возглавлявшейся *Тилло* и работавшей в верховьях рек Днепра, Оки, Зап. Двины, Дона, Волги и Сызрана.

Организация постоянных гидрометрических исследований была предпринята *Отделом земельных улучшений* Главного управления земледелия и землеустройства в 1909 г., сначала на окраинах, главным образом, в связи с нуждами мелиорации. Так, в 1910 г. начали действовать две *Гидрометрические части* — в Туркестанском крае и на Кавказе.

Первая развернула сеть, насчитывающую 114 водомерных постов и 14 постоянных гидрометрических станций (не считая многих постов, на которых также производились измерения расходов), охватывающих почти все главнейшие водные источники края. Гидрометрическая часть на Кавказе развила сеть до 100 водомерных постов и около 10 гидрометрических станций.

Труды обеих Частей до 1915 г. напечатаны в их годовых отчетах и представляют ценный вклад в гидрометрию Союза. Кроме наблюдений над уровнем и измерения расходов воды, большое внимание уделялось определению расходов наносов и их состава, температуре и химическому составу вод (а отчасти и гидробиологии вод) и гидрометеорологическим наблюдениям (осадки, испарение и пр.).

В 1913 г. была учреждена Гидрометрическая часть Европейской России, работавшая, главным образом, на второстепенных реках, которые не были освещены водомерными постами Министерства путей сообщения. Ее сеть достигла 374 водомерных постов, охватывающих 182 реки.

Помимо стационарных наблюдений, проводимых указанными тремя гидрометрическими частями, гидрометрические работы в довоенный период производились также многочисленными партиями Отдела земельных улучшений, исследовавшими притоки р. Уссури, Амуро-Зейский район, р. Абакан, реки Барабинской и Ишимской степей, Алтая, Семиречья, Туркестана, Кавказа, Крыма, некоторые притоки Волги и Днепра.

В связи с мировой и гражданской войнами наблюдается сокращение исследовательских и гидрометрических работ. Возобновление и дальнейшее развертывание их идет, главным образом, в связи с утилизацией водной энергии, а также в связи с нуждами водного транспорта, ирригации, водоснабжения: производятся исследования Волхова, Мсты, Невы, Свири, Куры, Риона, Ю. Буга, рек Карело-Мурманского края, Кавказа, Средней Азии, Урала, Алтая, Днепра, Волги, Камы и др. Возобновляется и исследование рек Сибири (бассейна Лены, притоков Оби, Енисея, Колымы, Индигирки), Дальневосточного края, соединительных водных путей (Березинского, Лаче-Кубенского, Камско-Печорского, Волго-Донского, Мариинского, Беломорско-Балтийского, Московско-Волжского) и лесосплавных рек. В отношении разработки методики гидрометрических и гидрологических наблюдений большая роль принадлежит ряду ведомств и организаций (б. Главное Электротехническое Управление ВСНХ, Главное Энергетическое Управление, НКПС, НКЗем, Академия Наук, НКВД).

Характерной особенностью всех этих исследований, в отличие от производившихся ранее, является их *комплексность*, предусматри-

вающая наиболее рациональное использование водных запасов и удовлетворение потребностей в воде всех заинтересованных отраслей народного хозяйства.

Что касается общего и гидрометрического исследования *озер* Союза, то надо отметить, что таковые изучены далеко недостаточно. Многие из них (мелкие и в малонаселенных районах) даже не показаны на картах. Более или менее подробно исследованы лишь большие озера, которые представляют интерес с точки зрения водных путей сообщения: Каспийское, Аральское, Ладожское, Онежское, Белое, Чудское, Ильмень, Байкал, Балхаш и некоторые другие (оз. Севан в Армении, Телецкое в Сибири).

Если общее число водомерных постов в 1916 г. составляло около 1500 (в прежних границах России), то в 1924 г. оно приближалось к 1300, а в 1927 г. достигало уже около 2000. В 1931 г., по данным Государственного гидрологического института, общее число учтенных постов и станций в Союзе по всем ведомствам составляло около 3000 (до 300 гидрометрических станций), а для 1937 г. оно может быть оценено цифрой порядка 5000. Однако и эта цифра является далеко не достаточной, если иметь в виду колоссальное протяжение рек и площадь территории Союза. Так, если последняя равна круглo 20 миллионам кв. *км*, то в среднем один пост обслуживает площадь около 4000 кв. *км*. Между тем, в Швейцарии один пост приходится примерно на 100 кв. *км*, в Баварии — на 280 кв. *км*, во Франции — на 400 кв. *км*, в Швеции — на 670 кв. *км*, а в Финляндии — на 1000 кв. *км* (по данным до 1920 г.). Густота же сети постов Союза, в связи с неодинаковой населенностью его отдельных частей, вдобавок, чрезвычайно неравномерна (например, в Европейской части по сравнению с Азиатской).

В 1919 г. в Петрограде был основан *Российский* (ныне *Государственный) гидрологический институт*, являющийся центральным научным гидрологическим учреждением для всего Союза. В его задачи входит объединение всех водных исследований в отношении методического руководства и разработки научных основ для рационального использования водных запасов Союза. Институтом разработан вопрос об основной *опорной гидрологической сети* пунктов и станций, обслуживающей, наряду с ведомственными сетями, гидрологические интересы всего Союза в целом. Эта сеть является самостоятельной, не зависящей от иногда узко ведомственных интересов отдельных Наркоматов и учреждений, действующей непрерывно и находится в ведении *Гидрометеорологической службы* Союза.

В 1937 г. она насчитывает 3160 наблюдательных пунктов, которые по объему и сложности производимых работ делятся на четыре разряда:

1) Гидрометрические станции III класса (*уровенные водомерные посты*) с элементарными наблюдениями (над колебаниями уровня воды один — три раза в день, температурой воды, вскрытием и замерзанием, толщиной льда, общим состоянием реки и погоды).

2) Гидрометрические станции II класса (*расходные водомерные посты*). Наблюдения производятся те же, что в предыдущем случае, с добавлением промеров русла (два раза в год) и периодических измерений расходов воды выездным персоналом.

3) Гидрометрические станции I класса с более сложными наблюдениями, требующими участия специалиста (с обычным объемом работ *гидрометрических станций).* На этих пунктах, сверх работ предыдущего разряда, производятся наблюдения над уровнем воды при помощи самопишущих приборов, регулярные измерения расходов воды и промеры русла на участке, съемка планов, измерение продольных уклонов поверхности воды, взятие проб воды и донных отложений и производство полевых лабораторных исследований их. Сверх того, эти пункты выполняют еще некоторые специальные работы по заданиям центральных учреждений.

4) *Гидрологические станции,* ведущие еще более сложные работы по изучению гидрологических процессов:

а) *стоковые станции,* изучающие зависимость между стоком, осадками и испарением в различных физико-географических условиях;

б) *русловые станции,* исследующие русловые процессы при разных режимах потока;

в) *гидрогеологические станции* для изучения подземных вод;

г) *озерные станции* для всестороннего изучения озер;

д) *гидробиологические станции.*

В результате работы опорной сети возможно будет всесторонне осветить территорию Союза в гидрологическом отношении и удовлетворить многочисленные практические запросы отдельных ведомств и общего характера.

Периодическое широкое обсуждение состояния изучения вод в Союзе и гидрометрических исследований, в частности, производится на созываемых Государственным гидрологическим институтом *всесоюзных гидрологических съездах,* которые имели место в Ленинграде в 1924 и 1928 гг.

С 1931 г. тот же институт начал выпускать продолжение сведений об уровне воды на внутренних водных путях СССР, издававшихся ранее б. Министерством путей сообщения.[1]

Наблюдения, производящиеся после 1930 г., печатаются в виде *Гидрологических ежегодников,* заключающих сведения об уровнях, расходах и температурах воды, наносах и ледовом режиме.

В 1929 г. при СНК СССР, с целью объединения всех работ по гидрологии, метеорологии и геофизике, был учрежден *Гидрометеорологический комитет* СССР, преобразованный в 1933 г. в *Центральное управление единой гидрометеорологической службы* СССР (ЦУЕГМС), а в 1936 г. — в *Главное управление гидрометеорологической службы* СССР (ГУГМС). Это Управление имеет в своем ведении ряд научно-исследовательских учреждений (Государственный гидрологический институт, Главная геофизическая обсерватория, Центральный институт погоды и др.) и 20 местных Управлений гидрометеорологической службы.

В 1931 г. Гидрометеорологическим комитетом начата грандиозная работа по составлению *кадастра вод* Союза, которая должна быть

---

[1] Том XI — бассейны Сев. Полярного моря и Тихого океана (1890—1910), т. XII — Балтийского и Белого морей, т. XIII — Каспийского моря, т. XIV — Черного и Азовского морей (1911—1915 гг.), и т. XVII — Каспийского моря (1916—1930 гг.).

закончена в 1938 г. Руководство этой работой сосредоточено в Государственном гидрологическом институте. В законченном виде кадастр будет представлять собой свод основных гидрологических и водохозяйственных сведений о водных объектах Союза и состоять из разделов рек, озер, болот, ледников, морей и подземных вод. Здесь найдут отражение все гидролого-гидрометрические исследования, произведенные в Союзе, а также исследования специальных кадастровых экспедиций.

В качестве первого приближения к кадастру, на основе уже собранных материалов, в 1937 г. заканчивается выпуск *гидрологических справочников* по всем видам вод Союза.

ГЛАВА I

НАБЛЮДЕНИЯ НАД УРОВНЕМ ВОДЫ

§ 3. Водомерные посты. Водомерные посты представляют устройства, позволяющие непрерывно (изо дня в день) и систематически (в определенные сроки) определять высоту уровня воды по отношению к некоторой неподвижной точке, называемой *нулем поста* или *нулем наблюдений*. Последний желательно установить с таким расчетом, чтобы уровень воды был всегда выше (а в некоторых типах постов — ниже) его, в противном случае появляются отрицательные отсчеты, показывающие, насколько ниже (или выше) нуля наблюдений стоял уровень воды, что несколько затрудняет обработку наблюдений.

Поэтому рекомендуется устанавливать нуль поста ниже самого низкого уровня (или выше самого высокого — в других типах), который может когда-либо наблюдаться. Знать этот уровень наперед не всегда возможно, а иногда и по техническим причинам трудно в момент устройства поста заложить его нуль на необходимой высоте, например когда *речный* или *свайный* пост устраивается во время высокого стояния уровня воды.

Нуль наблюдений должен быть связан нивелировкой по крайней мере с двумя прочными реперами, позволяющими контролировать неизменность его положения, а также положения других высотных точек, служащих для наблюдений.

По времени, на которое рассчитано действие поста, водомерные посты могут делиться на *постоянные* и *временные*. Первые устраиваются с целью длительных или стационарных наблюдений над режимом рек или водоемов, вторые — на более или менее непродолжительный срок, обычно при производстве изысканий или для специальных целей.

Существует еще род временных водомерных постов, называемых *передвижными* или *биржевыми* (если пост располагается около баржи), которые устанавливаются в местах стоянок изыскательских партий, иногда всего на несколько дней.

Место устройства поста обычно приурочивается к населенным пунктам, так как для обеспечения правильной работы поста чрезвычайно важно привлечь к наблюдениям хорошо грамотного, добросовестного и сознательно относящегося к делу наблюдателя, живущего поблизости от места наблюдений.

Если водомерный пост устраивается в *гидрометрическом створе*, т. е. в закрепленном знаками на местности поперечном сечении

потока, в котором определяются расходы воды, то такой пост называется *створным*.

Согласно делению наблюдательных пунктов опорной сети гидрометеорологической службы, различаются водомерные посты *уровенные* и *расходные*. В таком случае к последним относятся створные посты и посты, с которыми связываются измерения расходов воды, производимые в некотором удалении от них.

Посты, устраиваемые с целью определения уклонов водной поверхности потока, называются *уклонными* (*верхний* и *нижний*, иногда на обоих берегах).

Наконец, бывают посты *специального назначения*, организуемые, например, при зимних исследованиях, для целей предсказаний уровня и пр.

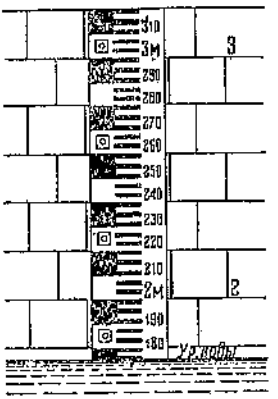


Рис. 1. Рейка на набережной.

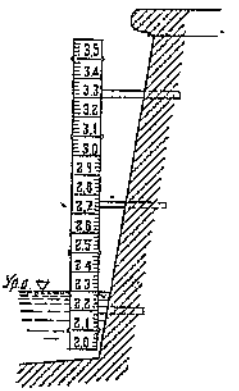


Рис. 2. Рейка у моста.

По способу определения положения уровня воды и роду приспособлений, служащих для производства наблюдений, водомерные посты можно разделить следующим образом:

I. *Простые*, на которых высота уровня воды определяется непосредственно по делениям смачиваемой водой рейки:

1) укрепленной неподвижно (*речный* тип);

2) переносной, устанавливаемой на головки забитых под водой свай (*свайный* тип);

3) и тем и другим способом совместно (смешанный *речно-свайный* тип).

II. *Передаточные*, когда отсчет переносится в другое, более удобное для наблюдений место:

1) с установкой каждый раз приспособлений для отсчета (*мостовой* тип);

2) с *автоматической непрерывной* передачей:

а) с отсчетом только при производстве наблюдения (не саморегистрирующие),

б) с непрерывной записью при помощи самопишущих приборов (саморегистрирующие, *лимниграфные* посты).

Наиболее распространенными в нашем Союзе являются посты первого типа (простые).

§ 4. Реечные посты. В этом типе поста самое важное — так укрепить рейку, чтобы обеспечить неизменность ее положения, так как некоторые смещения рейки, если они произойдут, могут остаться незамеченными для наблюдателя. Наличность ошибки в отсчетах

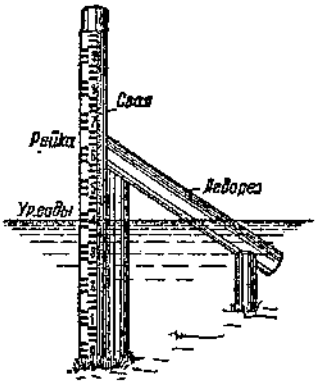


Рис. 3. Рейка на ледорезе.

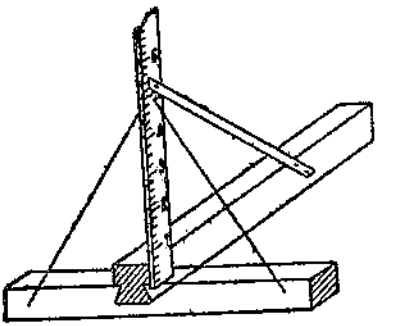


Рис. 4. Рейка для установки в каменистом русле.

будет обнаружена только при проверке поста и нивелировке, связывающей нуль наблюдений с репером, которая производится сравнительно редко; момент же, когда произошло смещение рейки, часто точно установить невозможно.

Вертикально стоящая рейка прочно прикрепляется к какому-либо сооружению, например набережной, устою моста, стенке шлюза, ледорезу, кусту свай или специально забитым сваям (рис. 1,2 и 3). Иногда вместо рейки деления наносятся на самом сооружении или высекаются в отвесной скале берега.

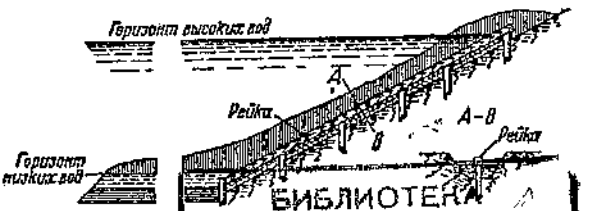


Рис. 5. Наклонная рейка.

Необходимо так установить рейку, чтобы она не могла быть сдвинута или повреждена ледоходом, плавающими судами и пр., для чего выбираются наиболее защищенные места (низовая сторона устоя, ледореза) или устраиваются специальные ограждения или пазы в сооружении.

Если рейка устанавливается в месте с каменистым дном, но допускающим забивки свай, то низ рейки прикрепляется к крестовине (рис. 4), которая надежно загружается камнем.

Длина рейки должна быть достаточной, чтобы можно было отсчитывать самые высокие и самые низкие стояния уровня воды, следовательно, она должна быть не меньше полной амплитуды колебания уровней, которая на некоторых реках достигает 12 м и более. При

БИБЛИОТЕКА Ленинградского Гидрометеорологического ИНСТИТУТА Инв. № 12913
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ СССР
РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА
А 32671

таких условиях целесообразно делить рейку на части, длиной до 3 м каждая, располагая их лестницей так, чтобы каждый отрезок являлся по высоте продолжением соседних, или переходить к свайному типу поста.

Кроме вертикальных реек, иногда применяются *рейки наклонные*, укрепляемые по откосу берега на прочных опорах (сваях, каменных или бетонных столбах; рис. 5). Сообразно с очертаниями берега, такая рейка может состоять из нескольких частей с различным наклоном. Если берег очень пологий, то для сокращения длины рейки в откосе делается выемка, а вода подводится канавкой. Такие рейки удобны в том отношении, что лучше защищены от ударов льда и плавающих предметов и при больших скоростях течения не создают подпора от набегающей воды, который затрудняет производство отсчета. Деления на них должны быть увеличены сообразно с наклоном, — так, чтобы отвечать делениям вертикальной рейки.

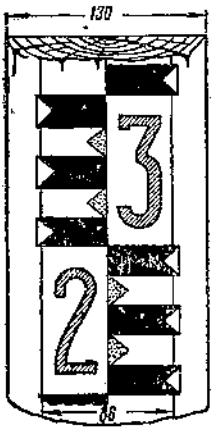


Рис. 6. Деления деревянной рейки.

В целях устранения ошибок от набегания воды на вертикальную рейку при больших скоростях течения и для лучшей защиты ее, нередко рейка относится в сторону и устанавливается в *ковше*, т. е. в яме, вырытой в береге и соединенной с рекой канавой достаточной глубины, чтобы обеспечить постоянное сообщение рейки с речной водой. Канава располагается в плане несколько под углом вверх по течению, во избежание засорения ее и ковша наносами.

Самые рейки, подобные нивелировочным, применяются как деревянные, окрашенные масляной или эмалевой краской, плоские или, лучше, с выжженными или вырезанными делениями и цифрами (рис. 6 [1]), так и более прочные — металлические: чугунные, железные и свинцовые, с выпуклыми делениями или делениями, составленными из фарфоровых или эмалированных пластинок ярких цветов, — рис. 7 (рейки *Зейбта-Фюсса*).

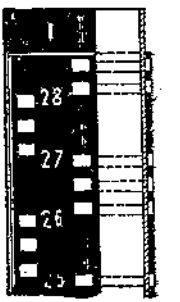


Рис. 7. Рейка Фюсса.

Наконец, делаются рейки и набивные, из тонкого листового цинка или оцинкованного железа с прорезанными делениями, пришиваемые гвоздями к гладкой доске или свае.

Деления наносятся через 1 или 2 *см*.

§ 5. Свайные посты. Свайный пост в вертикальном разрезе изображен на рис. 8. Он состоит из ряда свай, забитых в плане по одной прямой линии, расположенной примерно перпендикулярно к линии берега или общему направлению течения. Разность по высоте между головками соседних свай составляет обычно от 0,5 до 1,0 *м* (лучше 0,6—0,8 *м*), а если берег очень пологий, то и меньше, чтобы было удобно подойти к ближайшей находящейся под водой свае. Самую низкую сваю желательно забить немного ниже уровня

[1] Тип, принятый в Средней Азии.

самых низких вод, а самую высокую — немного ниже уровня самых высоких вод. Таким образом, число свай зависит от амплитуды колебаний горизонта воды и крутизны берега.

Нивелировкой определяются отметки головок всех свай или их высота по отношению к ближайшему реперу, который устанавливается на берегу в надежном месте, в створе поста или поблизости. Приняв за нуль поста головку нижней сваи, удобно для дальнейшего вычислить возвышения над ней головок остальных свай. Сваи нумеруются по порядку, сверху вниз.

Высота уровня воды отсчитывается при помощи переносной реечки, длиной около 1,5 *м*, которую наблюдатель хранит дома и которая устанавливается во время наблюдения вертикально на ближайшую от берега сваю, находящуюся под водой. Определив высоту уровня воды над этой сваей (записывается отсчет по рейке

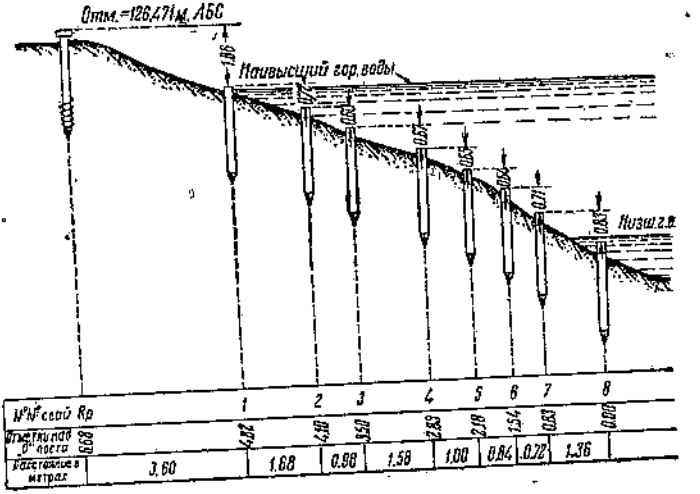


Рис. 8. Свайный пост.

и номер сваи), нетрудно вычислить путем простого сложения отметку уровня воды или высоту его над нулем поста.

Сваи берутся обычно деревянные (лучше всего сосновые или дубовые), диаметром 15—25 *см*, и забиваются до отказа ручной бабой весом 50—80 *кг*. В твердых грунтах на заостренный конец сваи иногда надевается металлический башмак, а на головку — во избежание раскалывания и размочаливания ее — железный обруч (бугель). Вообще рекомендуется забивать сваи на глубину не менее 1,3—1,5 *м* и во всяком случае сантиметров на 50 бо́льшую, чем глубина промерзания грунта. Когда свая забита, ее верх спиливается строго горизонтально на высоте 10—25 *см* от поверхности земли. Особенно важно, чтобы свая не выступала над землей в пределах горизонтов ледохода.

В торец сваи заколачивается крупный барочный гвоздь с выпуклой шляпкой, на которую и ставится переносная рейка. Низ рейки окован железом, чтобы наблюдатель мог по звуку судить, правильно ли он поставил рейку.

Гораздо прочнее и долговечнее металлические сваи — чугунные, из рельсов и фасонного железа или из буровых (обсадных) труб. Ведомством путей сообщения давно были введены в употребление специально отливаемые из чугуна сваи с винтовыми лопастями на нижнем конце, завинчиваемые в грунт при помощи особого ключа (на подобие гаечного), надеваемого сверху. Металлические сваи также хороши в качестве реперов.[1]

Свайный пост позволяет самому наблюдателю, без помощи нивелира, обнаружить изменения в высотном положении головок свай. Для этого рекомендуется поставить переносную рейку во время производства наблюдений поочередно на две ближайшие находящиеся в воде сваи. Разность отсчетов, как легко сообразить, должна равняться взаимному превышению головок свай и оставаться постоянной. В противном случае ясно, что одна из свай изменила свое положение. Узнать, какая свая изменила положение, нетрудно, проверив таким же образом или при помощи *ватерпасовки* (для свай, стоящих на сухом месте) относительные превышения других смежных свай.

В крутом скалистом берегу сваи могут быть заменены специально выбитыми в скале и пронивелированными ступенями, на которые с лодки устанавливается переносная рейка.

Забивка свай через определенные расстояния вдоль реки практикуется и для съемки мгновенного продольного профиля водной поверхности. В этом случае сваи берутся меньших размеров и забиваются на всем исследуемом протяжении реки одновременно, в условленный момент, так, чтобы верх свай был вровень с горизонтом воды. Затем отметки головок свай определяются нивелировкой по ближайшим реперам, и по ним, а также данным постоянных водомерных постов, строится продольный профиль.

Нередко устраиваются водомерные посты смешанного типа, оборудованные и неподвижной, постоянной рейкой и сваями, расположенными в одном створе. Наблюдения над низкими водами ведутся по рейке, а над высокими, когда рейка затоплена, — по сваям, или наоборот — сваи служат для наблюдений над низкими водами, а рейка — для высоких вод. Головки свай и деления рейки связываются нивелировкой между собой и с реперами.

§ 6. Мостовые посты. В передаточных постах, как уже было отмечено, отсчет производится не на поверхности воды, а в другом, более удобном месте, расположенном или непосредственно выше уровня воды или в стороне — на берегу.

Сюда относятся, прежде всего, посты *мостового* типа, в которых место отсчета поднято над самым высоким уровнем воды и определяется вертикальное расстояние от него вниз до поверхности воды. Таким образом, высоким уровням отвечают малые отсчеты, а низким — большие, и из отметки нуля поста для того, чтобы получить отметку горизонта воды, надо всякий раз вычитать сделанный отсчет. Такие посты удобно устраивать на искусственных сооружениях (мостах, набережных) или отвесном скалистом берегу, измеряя вертикальное расстояние от постоянной точки до поверхности воды опу-

[1] Описание употребительных конструкций реперов можно найти в курсах геодезии и водных исследований.

скаемой вниз размеченной цепью (например, с кольцами через 1—2 *см*), стальной рулеткой или гибкой, не изменяющей своей длины нитью, снабженными на нижнем конце грузом, или, наконец, рейкой. На естественных крутых берегах можно устраивать приспособление, на подобие изображенного на рис. 9.

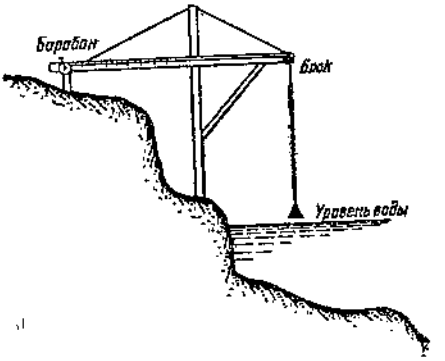


Рис. 9. Передаточный пост.

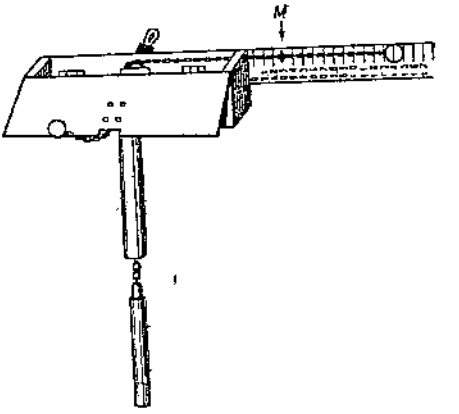


Рис. 10. Американский цепной пост.

В *американских* водомерных постах этого типа (рис. 10) цепь перекидывается через блок и вместо измерения длины цепи делаются отсчеты по горизонтальной рейке с помощью метки *M* на цепи. К нижнему концу цепи привешен груз цилиндрической формы. Для того, чтобы ветер не относил цепь, а также чтобы устранить влияние волнения, иногда груз с цепью опускается в трубе, нижний конец которой установлен на высоте самого низкого горизонта воды. Момент достижения грузом воды определяется наблюдателем по слуху или по изменению ощущаемого рукой натяжения цепи.

Рейка может быть устроена *выдвижная* (рис. 11), с заостренным нижним концом для более точного определения момента соприкасания его с водой (при спокойной поверхности), и снабжена микрометренным винтом, а в месте отсчета можно устроить нониус.

Вообще же момент соприкасания груза или низа рейки определяется на-глаз по кругам, расходящимся на поверхности воды.

Та же идея мостового поста удобно применима при определении положения уровня воды в колодцах и буровых скважинах; при большой же глубине, когда трудно уловить момент достижения воды грузом, употребляется так называемый *водяной свисток*, представляющий открытый снизу тяжелый конус, из которого воздух при погружении вытесняется водой со свистом через отверстие в верхней части конуса (рис. 12). Существуют и другие приспособления, применяемые для этой цели.

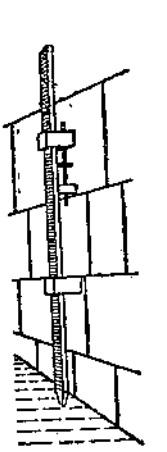


Рис. 11. Выдвижная рейка.

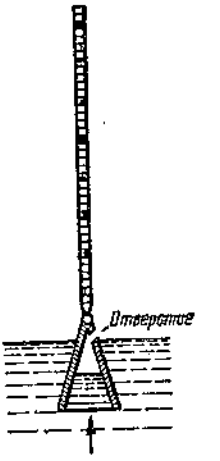


Рис. 12. Водяной свисток.

§ 7. Автоматические посты без самопишущих приборов. В этих постах передача действует автоматически и непрерывно, так что на-

блюдателю нужно только в определенные сроки записать показание прибора. Сама передача может преследовать цель не только перенесения места отсчета в более удобные условия, но и изменения масштаба колебания уровней (например, его увеличения для большей точности).

Передача может быть устроена:

1) *механическая* — при помощи поплавка, гибкой нити, блоков и зубчатых колес;

2) *электромеханическая* — с присоединением к механической передаче электрических приспособлений, позволяющих передавать показания на значительные расстояния (так называемые *дальноизвестители*, удобные, например, для предсказания приближающегося наводнения);

3) *пневматическая* и *гидравлическая*, основанная на том, что давление воды на погруженный в воду неподвижно установленный предмет изменяется по закону гидростатики с изменением высоты горизонта воды (глубины погружения). Воспринимающим давление предметом служит упругая камера (резиновая или металлическая), наполненная воздухом (пневматическая передача) или водой (гидравлическая передача), соединяемая трубкой с манометром или пьезометром.

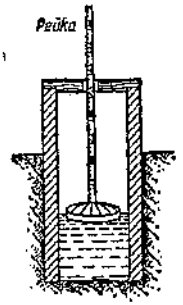


Рис. 13. Рейка на поплавке.

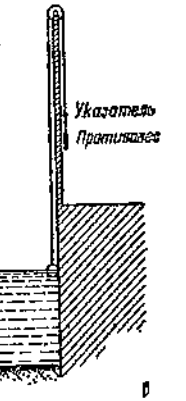


Рис. 14. Поплавковый пост у набережной.

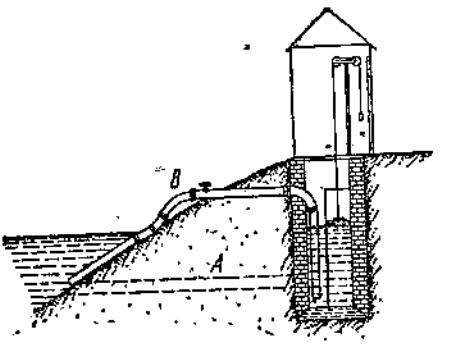


Рис. 15. Поплавковый пост в колодце.

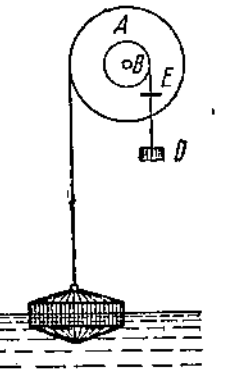


Рис. 16. Изменение масштаба уровней.

Наиболее распространенной является механическая передача с поплавками разных типов, хотя вообще у нас в Союзе такие устройства применяются довольно редко.

Поплавком чаще всего служит пустотелый металлический шар, цилиндр или линза. В простейшем случае рейка непосредственно прикрепляется к поплавку и перемещается вместе с ним вертикально,

скользя в направляющем отверстии и следуя колебаниям уровня воды. Такое приспособление удобно для наблюдения небольших колебаний уровня воды, например, в колодцах (рис. 13).

При больших колебаниях уровня поплавок подвешивается на тонком тросе или проволоке, которая перекидывается через блок и снабжается на другом конце грузом (рис. 14). Блок прикреплен к верхнему концу рейки, по которой делается отсчет по положению груза или особого указателя на проволоке. Такая рейка устраивается на искусственных сооружениях, где имеется достаточно глубоко стоящая вертикальная стенка. На естественных берегах проволоку приходится отводить системой блоков в сторону, что является уже менее удобным, так как возрастает трение и уменьшается чувствительность всего устройства, за которым нужен тщательный уход.

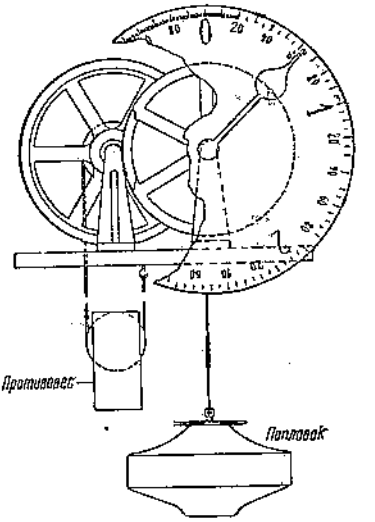


Рис. 17. Указатель уровня.

Гораздо надежнее помещать поплавок в колодец, устроенный на берегу, с будкой над ним (рис. 15), и сообщающийся с рекой (или озером) при помощи горизонтальной трубы *A*, закладываемой несколько ниже самого низкого уровня воды. Это устройство, нередко применяемое на постоянных гидрометрических станциях, хорошо тем, что оно:

1) позволяет вести наблюдения и в зимнее время, ибо можно легко сделать так, чтобы вода в колодце не замерзла;

2) ослабляет волнение, благодаря глубоко заложенному входному отверстию трубы;

3) защищено от повреждений ледоходом и судами;

4) допускает установку в будке самопишущего прибора — лимнографа.

Но зато оно довольно дорого, а трубу приходится часто прочищать, так как она засоряется наносами. Отчасти засорение может быть предотвращено устройством отстойных приспособлений у входа воды в трубу, но это еще более удорожает сооружение. Дешевле обходится соединение колодца с рекой при помощи сифона *B* (рис. 15), однако в этом случае условия работы поста сильно ухудшаются, так как вода в сифоне может замерзать, а скопляющийся в верхней части сифона воздух должен периодически выкачиваться, во избежание нарушения сообщения воды в колодце с рекой.

Изменение масштаба рейки, по которой делаются отсчеты, легко достигается тем, что блок, через который проходит проволока от поплавка, заменяется двумя наглухо скрепленными вращающимися на одной оси барабанами, отношение диаметров которых равно заданному изменению масштаба. Если масштаб нужно уменьшить (рис. 16), то конец проволоки от поплавка закрепляется на большом барабане *A*, с которого он сматывается при понижении уровня

и наматывается при повышении. Проволока от противовеса D с указателем E закрепляется и навивается на малом барабане B в противоположном направлении.

На рис. 17 показан автоматический указатель уровня воды *Фюсса*, в котором движение поплавка передается стрелке, позволяющей делать отсчет по циферблату.

Интересны две идеи, позволяющие значительно упростить передаточные приспособления и произвольно уменьшить масштабы отсчетов. Так называемая *«весовая водомерная рейка»* (рис. 18) представляет длинный призматический брусок немного тяжелее воды, подвешенный за один конец к обыкновенным пружинным весам (безмену). Весы укрепляются неподвижно, так, чтобы брусок нижним своим концом погрузился в воду. При повышении уровня воды брусок затопляется, а вес его уменьшается, в результате чего указатель весов начинает подниматься. Каждому горизонту воды соответствует определенный отсчет по весам, так что по нему можно определить высоту уровня воды. Весовая рейка, устроенная по этому принципу, была установлена в 1911 г. на Аральском море и показала вполне удовлетворительную работу.

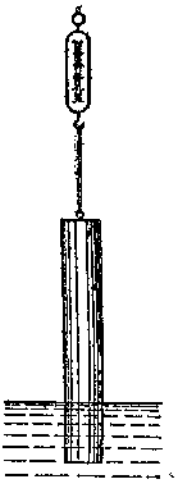


Рис. 18. Весовая рейка.

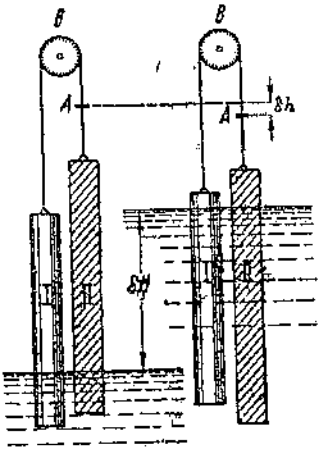


Рис. 19. Дифференциальная рейка.

Другая идея воплощается в *«дифференциальной водомерной рейке»*, которая состоит (рис. 19) из двух тяжелых призматических брусков, подвешенных к длинному шнуру, перекинутому через блок, и опущенных нижними концами в воду. Пусть площадь поперечного сечения бруска I равна m, а бруска II — n, причем $\frac{m}{n} = z > 1$, и система находится в равновесии. Тогда при повышении уровня воды на δH брусок I испытал бы, согласно закону Архимеда, облегчение на $m \cdot \delta H \cdot \Delta$, ($\Delta$ — удельный вес воды), а брусок II — на $n \cdot \delta H \cdot \Delta$. Так как $m > n$, то равновесие нарушится: брусок I поднимется, а брусок II опустится на некоторую величину δh, после чего равновесие восстановится. Для этого необходимо, чтобы потеря в весе обоих брусков была одинакова, т. е.

$$m(\delta H - \delta h)\Delta = n(\delta H + \delta h)\Delta,$$

или

$$\frac{m}{n} = \frac{\delta H + \delta h}{\delta H - \delta h} = z,$$

откуда:

$$\frac{\delta h}{\delta H} = \frac{z-1}{z+1} = \frac{m-n}{m+n}. \qquad (1)$$

Таким образом, отношение перемещения указателя A к величине повышения уровня (или масштаб уменьшения) может быть легко определено для данного отношения площадей поперечных сечений брусков. Обратно, можно задаться таким отношением площадей поперечных сечений брусков, чтобы получить любое изменение масштаба. Для отсчета перемещений δh по указателю A надо против последнего прикрепить неподвижную реечку с делениями, уменьшенными в най-

денном отношении $\frac{\delta h}{\delta H}$, или разметить деления на блоке B и делать отсчеты по неподвижному указателю. Длина брусков должна быть такова, чтобы при всех возможных положениях уровня они не выходили из воды.

Достоинства описанных приборов заключаются в простоте передачи, небольших перемещениях брусков при больших колебаниях уровня воды и несложности производства наблюдений. Кроме того, бруски требуют колодца небольшого сечения, который может быть устроен из трубы, а благодаря этому уменьшается количество воды, поступающей в колодец, и опасность его замерзания.

§ 8. Автоматические саморегистрирующие посты. Эти посты устраиваются с передачей, описанной в предыдущем параграфе, причем передвижной указатель высоты уровня заменяется карандашом или пером, чертящим линию на клетчатой бумаге, навернутой на цилиндр, медленно вращающийся при помощи часового механизма. В других системах движение поплавка передается цилиндру, а перо передвигается часами.

Самопишущие приборы для рек и озер получили название *лимнографов*, для морей — *мареографов*.

Наиболее распространены приборы с поплавковой передачей, которых существует несколько систем, отличающихся конструктивными особенностями и расположением механизмов; но применяются и лимнографы и мареографы, действующие сжатым воздухом, а также снабженные электрическими приспособлениями для передачи отсчета или записи на расстояние.

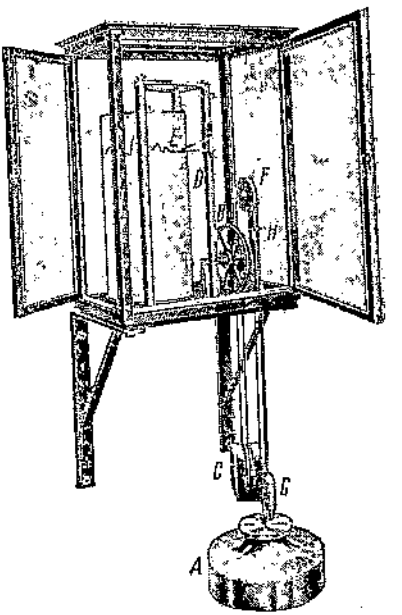


Рис. 20. Лимнограф Фюсса.

Цилиндр с бумагой может располагаться вертикально и горизонтально или заменяться вращающимся диском. Часовой механизм помещается в самом цилиндре или вне его; в последнем случае устраивается передача от часов к оси цилиндра. Время полного оборота цилиндра вокруг своей оси или действия часового механизма может быть разное: от нескольких часов до месяца и более. Масштабы записи колебаний уровня также самые разнообразные, не только уменьшенные, но и увеличенные. В соответствии с масштабом времени и высот заготовляется специально разграфленная бумага. При записи на цилиндре она имеет прямоугольную сетку, если перо перемещается по прямой линии, параллельной оси цилиндра, и кривые линии времени, если перо описывает дугу круга. При записи на диске бумага имеет форму круга, на котором уровни отсчитываются по концентрическим окружностям, а время — по радиусам.

На рис. 20 изображен простой поплавковый лимнограф *Фюсса*, в котором часовой механизм заключен внутри съемного цилиндра, вращающегося на вертикальной оси. Нить поплавка A навернута на шкив B, соединенный наглухо с меньшим шкивом, с которого опу-

скается блочный противовес *C*. Вал шкива при помощи зубчатого колесика перемещает вертикальную зубчатую реечку (которая не видна) вдоль стойки *D*, а к верхнему концу реечки прикреплено перо *E*, прижимающееся к бумаге. Для проверки записи и правильной установки пера служит рулетка *F* с грузом *G* и указателем *H*. Диаметр цилиндра — 187 *мм*, время полного оборота — 1 или 7 дней, диаметр поплавка — 250 *мм*. При высоте цилиндра около 32 *см* можно записывать колебания уровня до 1,6 *м* в масштабе $^1/_5$ и до 6,5 *м* в $^1/_{20}$ натуральной величины, а при высоте около 50 *см* и тех же масштабах — до 2,5 и 10 *м*.

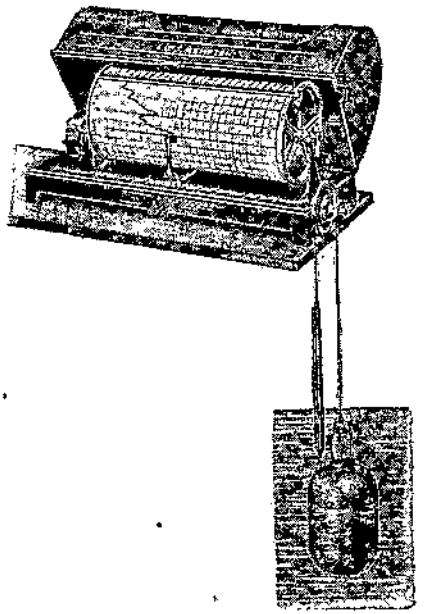


Рис. 21. Лимниграф Отта с вращением барабана от часов.

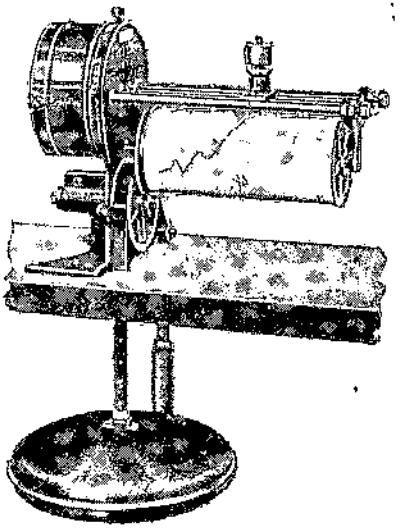


Рис. 22. Лимниграф Герлей с вращением барабана от поплавка.

На рис. 21 изображен еще более простой лимниграф *Отта* с горизонтальным барабаном (диаметр цилиндра 122 *мм*, высота 250 *мм*), причем перо передвигается винтовым стержнем (шпинделем), вращающимся на шариковых подшипниках и непосредственно соединенным со шкивами, служащими для подвеса поплавка и противовеса. Масштабы — $^1/_{10}$ или $^1/_{20}$ (для колебаний уровня до 2,5 или 5 *м*), время одного оборота барабана — $1^1/_3$, 8, 16 или 32 дня.

В американских лимниграфах подобной конструкции иногда устраиваются приспособления, позволяющие не менять лист бумаги после каждого оборота цилиндра, а производить запись на длинной ленте, которая, сматываясь с барабана, где пишет перо, наматывается на другой, рядом стоящий барабан.

На рис. 22 показан американский лимниграф *Герлей* с горизонтальным барабаном, в котором перо передвигается часами, а барабан поплавком.

Рис. 23 изображает походный переносный лимниграф *Отта*, записывающий колебания поплавка в натуральную величину и удобный, например, для наблюдений над уровнем воды во время измерения расхода воды и на передвижных водомерных постах.

На рис. 24 дана схема мареографа *Хонда*, усовершенствованного *Кузнецовым*, действующего сжатым воздухом. Последний сжимается водой в приемном низком цилиндре A с отверстиями, установленном на дне, откуда давление по медной или свинцовой трубке B внутреннего диаметра около 6 *мм* передается манометру C, наполненному ртутью. В последней помещен стальной поплавок E с направляющей, которым колебания уровня ртути передаются через нить

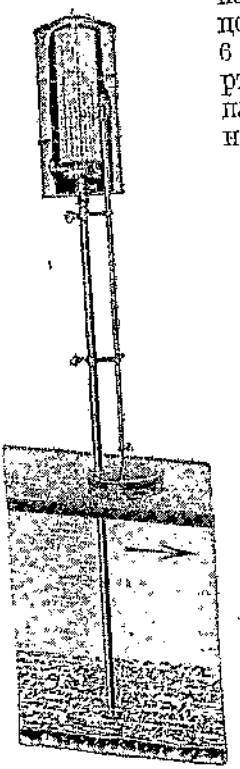


Рис. 23. Переносный лимниграф Отта.

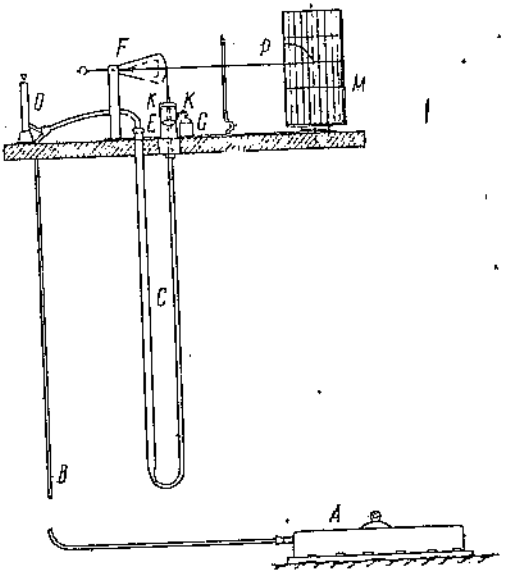


Рис. 24. Схема мареографа Хонда.

сектору F с противовесом. Соединенное с сектором перо P вычерчивает колебания горизонта воды на барабане M, приводимом во вращение часовым механизмом.

При стихийно высоких подъемах уровня воды, для того, чтобы перо не выходило за пределы барабана, ртуть по достижении уровня $K — K$ автоматически отливается сифоном в чашку G. Помощью насоса D в трубку B и приемник A ежедневно подкачивается воздух.

Постоянные лимниграфы требуют устройства колодца для поплавка и будки над ним. Поэтому лимниграфные посты представляют дорого стоящие сооружения, устанавливаемые в СССР довольно редко, например на некоторых постоянных гидрометрических станциях и при гидроэлектрических станциях. В Западной Европе и Аме-

рике они распространены гораздо шире. Различные схемы установки лимниграфов показаны на рис. 25.

Для контроля действия лимниграфа делаются специальные приспособления (как на рис. 20) или устраивается рядом простой водомерный пост. Особенно тщательно должен быть устроен часовой механизм, для чего часто применяются часы с маятником и гирями, снабженные специальными приспособлениями для того, чтобы на ходе часов не отражались колебания температуры и чтобы они не подвергались вредному действию влажности и пыли. Точность показаний лимниграфа также тесно связана с размерами

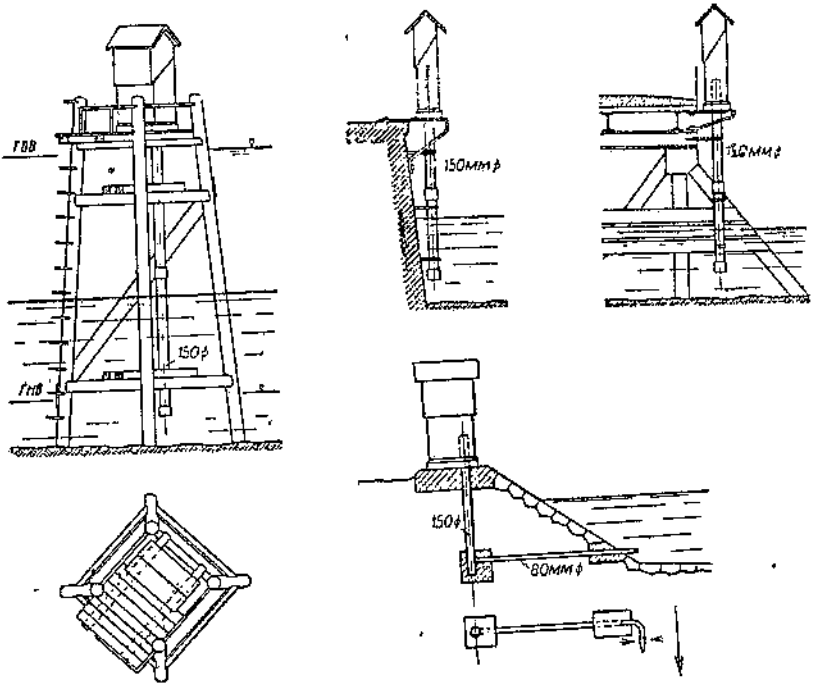


Рис. 25. Схемы установки лимниграфов.

и формой поплавка и с уменьшением до минимума трения в передаточных механизмах, обеспечивающими достаточную чувствительность прибора в смысле улавливания небольших изменений уровня воды и передачи их без опозданий перу.

§ 9. Приборы для регистрации максимальных и минимальных уровней. Лимниграф, представляя дорогое сооружение для непрерывной записи колебаний уровня воды, иногда может быть заменен более простыми и дешевыми приспособлениями, отмечающими только наивысшие и наинизшие уровни, имевшие место за некоторый промежуток времени. На обыкновенных постах наблюдения производятся в определенные часы дня, уровень же воды изменяется непрерывно и иногда, например на горных реках, так быстро, что успевает подняться и упасть за промежуток времени между двумя смеж-

ными наблюдениями. Таким образом, регулярными наблюдениями будут захвачены случайные, нехарактерные стояния уровня.

Минимальные и *максимальные автоматические рейки* устраиваются или простые, когда вода оставляет видимый след своего крайнего положения (на бумаге или на дереве), или механические — с поплавком, который может перемещаться только в одном направлении, вверх или вниз.

Первого типа рейки применяются исключительно для закрепления наивысшего положения уровня воды.

В одном случае вертикально устанавливается (удобно установить рядом с постовой рейкой) газовая или водопроводная труба с серией отверстий, просверленных по высоте в боковой поверхности, для того, чтобы вода могла проникать внутрь. В трубу сверху опускается железный стержень с головкой, завинчиваемой ключом, в качестве крышки; на стержне укрепляется длинная полоска бумаги с чертой, проведенной вдоль нее чернилами или химическим карандашом. Наивысшее положение уровня воды определяется по границе размытых чернил или карандаша.

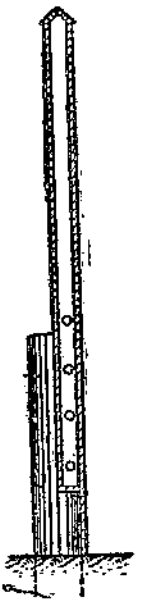


Рис. 26. Рейка Близняка.

Другим подобным прибором служит рейка системы *Близняка* (рис. 26), имеющая вид продолговатого ящика квадратного сечения с отверстиями. Внутренняя поверхность стенок покрывается сначала чёрной масляной краской, а по ней разведенным в воде мелом, или же просто задняя выструганная стенка натирается древесным углем. И в том и в другом случае по разнице цвета верхней, не подвергавшейся заливанию, и нижней, смытой водой или потемневшей, частей нетрудно установить высоту, на которую поднимался уровень воды. Прибор укрепляется на свае или на стволе стоящего на берегу дерева. Расставленные вдоль по реке такие приборы удобны для получения продольного профиля высоких вод.

Максимальная рейка с поплавком системы *Фролова* представлена на рис. 27. Она снабжена зубцами, в которые упираются пружины поплавка *p*, поднимающегося вместе с уровнем воды.

Рейка системы *Владычанского* (рис. 28) фиксирует максимальный и минимальный горизонты воды при помощи двух зубчатых реечек, соединенных с поплавками. Зубцы реечек так устроены, что один поплавок может только подниматься, а другой только опускаться. Для этого верхние концы реечек пропущены через коробки с задерживающими механизмами, поплавки же передвигаются вверх и вниз по направляющим боковым тягам. На реечках нанесены деления, и отсчет по ним делается по верхнему ребру коробок. Между подвижными реечками укреплена основная неподвижная рейка. После отсчетов с помощью особого ключа поплавки приводятся на поверхность воды и рейка оставляется до следующего наблюдения.

Весь прибор устанавливается на свае, забитой в дно небольшого котлована, вырытого в береге и сообщающегося с рекой каналом.

На рис. 29 изображен максимальный и минимальный измеритель уровня *Гаслера*, состоящий из поплавка, передаточного механизма и циферблата с тремя стрелками. Движения поплавка передаются основной (черной) стрелке, показывающей высоту уровня в данный момент. Эта стрелка при движении в разные стороны передвигает с собой в одном направлении стрелку, показывающую наивысший уровень, а в другом — стрелку, показывающую наинизший уровень. Вся

система заключена в коробку, а поплавок опущен в вертикальную трубу (на чертеже не показан противовес).

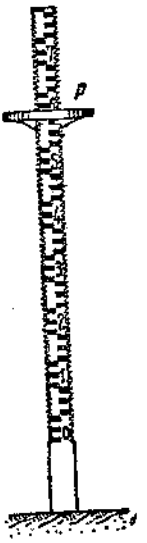


Рис. 27. Рейка Фролова.

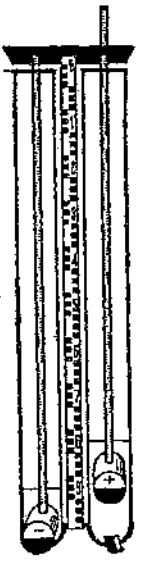


Рис. 28. Рейка Владычанского.

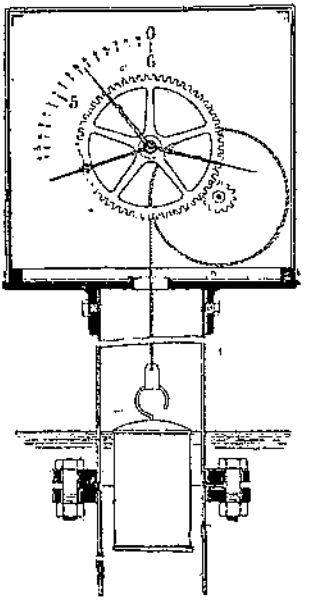


Рис. 29. Указатель Гасслера.

§ 10. Приспособления для точного отсчета уровня. В некоторых случаях, например при определении уклона водной поверхности или при гидравлических исследованиях (определение коэфициента шероховатости, см. § 54), важно с большой точностью измерить высоту уровня. Этой цели служат:

1) приспособления для успокоения водной поверхности;

2) усовершенствования самих измерительных приборов.

О некоторых приспособлениях, служащих для успокоения водной поверхности в месте производства отсчета по рейке или нахождения поплавка, уже упоминалось выше. Таковыми являются: рейка в ковше и колодец или труба, в которых перемещается поплавок. С этой же целью иногда практикуется установка вокруг рейки или свай снабженных отверстиями бездонных ящиков или труб, опускаемых на некоторую глубину или до дна.

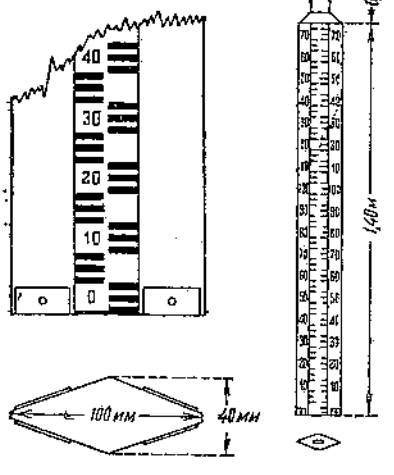


Рис. 30. Переносная рейка для свайного поста.

При отсчете высоты уровня воды на свайном водомерном посту часто употребляется рейка *ромбического* поперечного профиля

(рис. 30) для уменьшения подпора, создаваемого течением; рейка ставится на сваю так, чтобы одна из острых граней рейки приходилась навстречу течению. Самая рейка может быть разделена более мелко, например через ½ *см*.

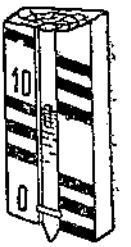


Рис. 31. Успокоитель Аполлова.

Уточнение отсчета по рейке при волнении может быть достигнуто также при помощи успокоителя *Аполлова* (рис. 31), представляющего толстостенную стеклянную трубку диаметром 1—2 *см*, помещенную в специальный желобок в рейке и открытую с двух концов. Нижний конец трубки оттянут для уменьшения входного отверстия, благодаря чему амплитуда волны в трубке может быть очень сильно уменьшена. Отсчет уровня делается по ярко окрашенному поплавочку, помещенному внутри трубки.

Более точные результаты дает *измеритель Соколова* (рис. 32), состоящий из стеклянной трубки диаметром 2 *см* в медной оправе. В нижней части последней помещен кран, открываемый и закрываемый тягой. Одна из стоек оправы служит шкалой и имеет деления через 2 *мм*; по ней передвигается указатель, закрепляемый винтом.

Поставив прибор вертикально на головку сваи, открывают кран и, выждав, когда затихнут колебания уровня воды в трубке, закрывают его. Затем, вынув прибор из воды, устанавливают указатель и делают отсчет по шкале с точностью до 1 *мм*. Нуль шкалы расположен так, что отсчет дает высоту уровня воды над головкой сваи.

Для точного определения поверхностного уклона потока в ямах, вырываемых в береге и соединенных канавками с рекой или каналом, забиваются сначала свайки,

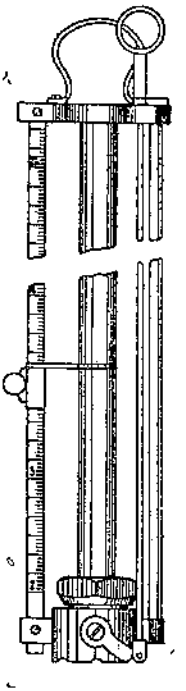


Рис. 32. Измеритель Соколова.

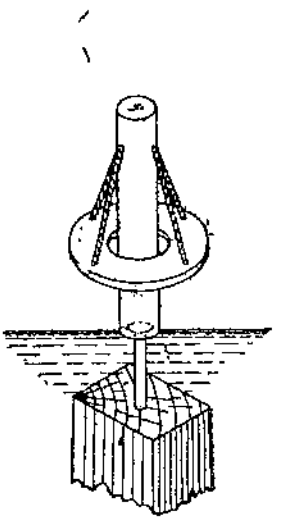


Рис. 33. Прибор Скобея.

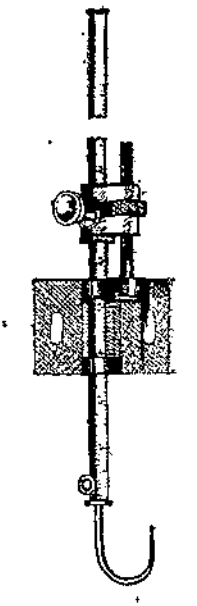


Рис. 34. Американская крючковая рейка.

несколько ниже поверхности воды, а затем, в определенный момент, в них вбиваются гвозди с круглой шляпкой, точно до поверхности воды, по которым производится нивелировка.

Для более точного совмещения верха шляпки гвоздя с поверхностью воды может применяться приспособление, предложенное *Скобеем*, состоящее из сплошного металлического цилиндра, к подошве которого припаян крючок (рис. 33), причем

конец крючка выходит за пределы окружности цилиндра и находится в одной плоскости с его основанием, срезанным нормально к оси. Цилиндр ставится вертикально на гвоздь, и ударами по верхнему его основанию острие крючка, а следовательно, и верхняя точка шляпки гвоздя, совмещаются с поверхностью воды. Для соблюдения вертикальности цилиндра при забивании гвоздя имеется контрольное приспособление, состоящее из плоского кольца с отверстием, немного большим, чем сечение цилиндра, подвешенного на двух кусках хорошо промасленного манильского линя, пропущенного через два взаимно перпендикулярных канала, высверленных в верхней части цилиндра. Кольцо действует как отвес и не должно касаться цилиндра при забивании гвоздя.

Очень точно можно отсчитать уровень также по *выдвижной рейке*, снабженной в нижней части крючком, а в месте отсчета — нониусом и микрометренным винтом. Это — мостовой тип поста, широко применяемый американцами. Металлическая рейка (рис. 34) может быть сделана переносной, надеваемой при помощи специальных отверстий на заранее укрепленные на нужной высоте в разных пунктах наблюдений гвозди или винты.

Наконец, весьма точно можно определить положение уровня воды, применяя устройства наподобие изображенного на рис. 10, если заострить тяжелый цилиндр снизу, а цепь заменить тонкой прочной проволокой.

§ 11. Выбор места и типа поста. Если водомерный пост устраивается для наблюдений над колебаниями уровня воды в озере (или в море), то приходится заботиться главным образом о том, чтобы на показания поста не влияли посторонние факторы, их искажающие, например впадение значительного притока (уровень вод в этой части озера может стоять выше, чем в остальных частях), узкий залив, куда ветер может нагонять воду или, наоборот, сгонять ее, слишком отмелый берег (по той же причине). Помимо этого необходимо выбрать наиболее удобное для устройства поста и наблюдений место, где постовые устройства были бы наилучшим образом защищены от действия льда, плавающих судов и пр. Наконец, как уже упоминалось в § 3, важно установить пост там, где можно найти поблизости хорошего наблюдателя.

Если пост устраивается у гидротехнического сооружения (существующего или проектируемого для изучения условий работы последнего), то часть вышеприведенных соображений, естественно, отпадает: приходится иметь в виду, главным образом, защищенность поста и удобство наблюдений.

Посты, устраиваемые при речных изысканиях, должны дать достаточно полное освещение характерных участков реки, почему они обычно приурочиваются к местам впадения притоков, а также резкого изменения уклона (например, у порогов, при резком изменении ширины и глубины реки и т. д.).

Особое внимание должно быть обращено на выбор места для постов, у которых будут производиться *измерения расхода*, так как в этом случае от избранного места будет находиться в тесной зависимости характер связи расходов и уровней и точность учета стока реки. Эти посты надо стремиться располагать в таких местах, где высота стояния уровня зависела бы исключительно от расхода воды. В связи с этим, помимо требований общего характера, необходимо:

1) выбирать участок реки, на котором течение приближается к условиям равномерного движения;

2) выбирать по возможности такой участок, на котором русло реки было бы неизменяемым;

3) выбирать участок, удобный для измерения расходов и устройства поста;

4) избегать слишком длинных прямых и широких участков, расположенных по направлению господствующих ветров.

Для того, чтобы течение воды приближалось к условиям равномерного движения, необходимо выбрать участок реки без притоков, с руслом призматической формы и постоянным однообразным продольным уклоном водной поверхности, не зависящим от колебаний уровня. Конечно, удовлетворить этим условиям на естественном потоке в полной мере, строго говоря, невозможно. Можно только в той или иной степени приблизиться к ним, выбирая наиболее подходящий среди других участок. Длину его желательно иметь равной, примерно, пятикратной ширине реки. Весьма важно проверить, не попадает ли намеченный участок в сферу подпора, источником которого могут быть: а) самостоятельные повышения уровня ниже по течению в озере или реке, куда впадает исследуемая река, или происходящие от впадения в нее значительного притока, и б) наличность ниже по течению водоподпорных сооружений, заколов, перекатов, а зимой — удобных мест для образования ледяных заторов.

Обычно инструкциями предлагается располагать пост в расстоянии от источника подпора не меньшем, чем

$$L' = \frac{2z}{i} \qquad (2)$$

(см. рис. 35), однако применение этой формулы вряд ли можно рекомендовать, так как она вовсе не учитывает глубины потока и дает прогрессивное преуменьшение длины кривой подпора L для значений $z < \sim 1{,}3h_0$ и преувеличение, когда $z > \sim 1{,}3h_0$. [1] Гораздо более надежной является столь же простая приближенная зависимость, получаемая из уравнения *Толкмита:*

$$L = \frac{h}{i} = \frac{h_0 + z}{i}. \qquad (4)$$

Некоторый недостаток этой формулы заключается в том, что, давая всегда значения L с запасом, [2] она дает тем большее преувеличение, чем меньше отношение $\frac{z}{h_0}$, но этот недостаток не является столь существенным. На рис. 35 видно, что длина L равна расстоя-

---

[1] Эта формула дает значение L', совпадающие с вычисленными по более точной формуле *Дюпюи-Рюльмана:*

$$L_D = \frac{h_0}{i} \; D\left(\frac{z}{h_0}\right), \qquad (3)$$

только в частном случае, когда $z = \sim 1{,}3\ h_0$. Если положить $z = 0{,}5\ h_0$, то, $L' = 0{,}80\ L_D$ (преуменьшение на 40%); при $z = 3\ h_0$ имеем $L' = 1{,}37\ L_D$ (преувеличение на 37%).

[2] По сравнению с более точной формулой Толкмита:

$$L_T = \frac{h_0}{i} \; T'\left(\frac{h}{h_0}\right), \qquad (5)$$

запас получается при $z = 0{,}5\ h_0$ равным 8%, при $z = 3\ h_0$ равным 0,1%,—т. е. результаты несравненно лучшие.

нию от преграды до точки пересечения дна горизонтальной прямой, проведенной через начало кривой подпора.

Величина z определяется как наибольший возможный подпор у источника подпора над нормальным (естественным) уровнем, при котором глубина равна h_0; глубину h можно определить (с некоторым запасом) как наибольшую возможную глубину, отсчитываемую от средней линии дна по фарватеру[1] непосредственно перед местом образования подпора.

Средний поверхностный уклон реки $I = i$ определяется при помощи нивелировки, причем надо иметь в виду, что это есть уклон при отсутствии подпора, следовательно, его нужно определять именно

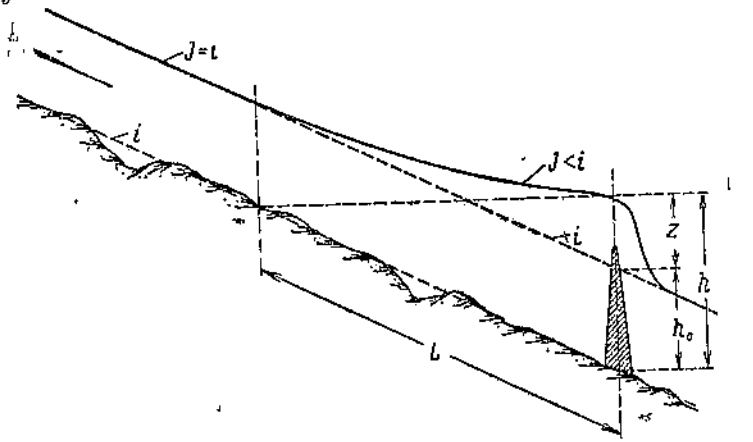


Рис. 35. Распространение подпора.

для такого состояния реки, а если это невозможно, то только для той части реки, на которую подпор заведомо не распространяется, или путем вычисления его, учитывая величину $z = h - h_0$.

Лучше расположить пост, если это возможно, ниже источника подпора. Если все же по каким-либо соображениям приходится устанавливать пост в пределах подпертого участка, то необходимо устроить дополнительный пост, расположенный у источника подпора, несколько выше его по течению. Этот пост, связанный с основным, позволит определять переменное падение уровня между постами, зависящее от подпора, и вводить соответствующие поправки в связь между расходами и уровнями на основном посту (§ 63).

Неизменяемость русла представляет также чрезвычайно важное условие, так как, если русло изменяется (размывается или заносится), то даже при постоянном уклоне водной поверхности не будет существовать однозначной зависимости между площадью поперечного сечения и высотой стояния уровня воды, и это обстоятельство также затруднит установление кривой расходов и усложнит подсчет стока. Обычно наиболее устойчивым руслом обладают прямолинейные участки реки с симметричным корытообразным сечением.

[1] Линия наибольших глубин в плане.

Удобства измерения расходов и устройства поста в главных чертах сводятся к следующим требованиям:

а) желательно иметь по возможности сжатое русло, без рукавов и широкого разлива, с не очень пологими берегами;

б) следует избегать участков с негоризонтальной по ширине реки поверхностью воды (повороты русла, близкое впадение притоков), а также зарастающих водной растительностью;

в) нужно заботиться о доступности местоположения и сохранности постовых устройств.

На очень длинных прямых участках, расположенных по направлению господствующих ветров, может происходить нагон и сгон воды, искажающий показания поста.

Выбор типа поста определяется его назначением и местными условиями. Посты временные и при изысканиях обыкновенно устраиваются простейшего типа, посты постоянные — смотря по назначению, простого или передаточного типа, без автоматической записи, или самопишущие лимнографные (когда требуется детальное изучение хода колебаний уровня).

Местные условия играют роль, главным образом, в отношении характера и грунта берегов, наличия гидротехнических сооружений, амплитуды колебаний уровня воды, характера ледохода, качества наблюдателя и пр.

§ 12. Организация и производство наблюдений на посту. Когда водомерный пост устроен, необходимо нивелировкой определить взаимное высотное положение его опорных точек (свай, нулей реек, нуля наблюдений) и связать их с реперами, а также измерить расстояния, определяющие положение отдельных элементов поста в плане. В результате работы по устройству поста должно быть составлено подробное его описание или так называемый *технический список* поста (см. приложение 1). В последнем приводятся: подробные сведения о местоположении поста, наблюдателе, характере и сроках наблюдений, описание участка реки в районе поста и самого поста и его устройств, сведения о реперах, сваях и рейках. К списку прилагаются чертежи: схематический профиль поста, поперечный профиль реки и план участка ее в районе расположения поста.

На уровенном водомерном посту обычно промеряется поперечный профиль реки в одном постовом сечении (производство промеров глубин описано в гл. III) с нивелировкой берегов до наивысшего уровня, план составляется глазомерно. На постах расходных (и гидрометрических станциях I класса) промеры глубин и съемка должны охватывать участок реки длиной в 5—10 ширин; съемка делается инструментальная (мензульная или тахеометрическая), со включением незатопляемых берегов.

Выбор добросовестного, сознательного наблюдателя, как уже отмечалось, имеет чрезвычайно большое значение, так как в обычных условиях контроль наблюдений и поверка поста производятся сравнительно редко. Наблюдателю нужно разъяснить всю важность порученного ему дела, необходимость точно выполнять инструкции и особенно недопустимость фантазии — записывания в журнал выдуманных отсчетов или отсчетов на расстоянии, без посещения

1867

поста. В таких случаях лучше оставлять пропуски в журнале, чем вставлять неверные, фиктивные цифры.

В связи с этим необходимо обеспечить пост приспособлениями, облегчающими подступ к сваям или рейке (лодки, сходни, мостки), и всеми нужными для наблюдений принадлежностями, к каковым относятся: 1) часы, 2) переносная рейка для свайных постов, 3) фонарь для вечерних наблюдений, 4) пешня (ломик) для околки льда зимой, 5) багор для нащупывания свай, находящихся под водой, 6) ватерпас с рейкой для ватерпасовки свай (для самостоятельной проверки наблюдателем их положения), 7) книжки для записи наблюдений и канцелярские принадлежности, 8) приборы для специальных наблюдений, если таковые производятся (ледомерная рейка, термометры и пр.).

Сроки производства наблюдений устанавливаются сообразно с назначением поста и характером режима реки или водоема. Обычно наблюдения производятся в три срока: 7 ч. утра, 1 ч. дня и 7 ч. вечера. По инструкции НКПС наблюдения производятся нормально один раз в сутки (в 8 ч. утра), а во время быстрых повышений и понижений уровня воды в половодье, при ледяных заторах и нагонных и сгонных ветрах — еще в 1 ч. дня и 8 ч. вечера. Вообще наблюдения один раз в сутки производятся довольно часто и достаточны для больших рек, на которых уровень изменяется медленно. Сверх трех основных сроков, назначаются иногда дополнительные сроки наблюдений, например в 10 ч. утра, 4 ч. дня и 10 ч. вечера, а иногда, в особых случаях, и чаще.

По новой инструкции Гидрометеорологической службы (1937 г.) на реках с суточным ходом уровней устанавливаются двукратные наблюдения (7 ч. утра и 7 ч. вечера), среднее из которых хорошо отражает среднесуточный уровень, как это подтверждено американской и союзной гидрометрической практикой. При кратковременных паводках необходимы учащенные наблюдения.

Самая техника отсчета высоты уровня уже ясна из сделанного описания разных типов постов. При наличии волнения наблюдатель записывает среднее из двух отсчетов: при наинизшем и наивысшем положениях уровня воды. Если последний опускается ниже головки самой низкой сваи, то наблюдатель измеряет рейкой высоту от уровня воды до головки сваи, записывая отсчет со знаком «минус» или приписывая слово «ниже». Когда и эта свая обсыхает, забиваются дополнительные колья с определением по ватерпасу высоты их головок по отношению к нижней свае. Зимой вокруг постоянной рейки лед окалывается, чтобы дать свободный доступ воде, а над постовыми сваями делаются проруби для переносной реечки.

При основном, утреннем наблюдении отмечаются: *состояние погоды* (ясно, пасмурно, дождь и т. д.), *ветер* и его направление, *волнение*, *состояние ледяного покрова (сало, ледоход, ледостав, заторы)*, проход по реке первого (после весеннего ледохода) и последнего (перед осенним ледоставом) судна и результаты специальных наблюдений.

Чаще всего наблюдатель снабжается двумя тетрадями для записи: *полевой книжкой* и *журналом*. Первая может быть месячная или годовая и является основным документом, в который записи зано-

сятся *на месте наблюдений.* Из нее они переписываются ежедневно в журнал, состоящий из месячных корешков с отрывными талонами, отправляемыми по окончании каждого месяца в учреждение, в ведении которого состоит пост.

Формы записей наблюдений довольно разнообразны. Две из них для свайных постов (полевая книжка и журнал) приведены в приложениях 2 и 3.

§ 13. Поверка, ремонт и перенос поста. Поверка поста имеет целью: 1) контроль работы наблюдателя, т. е. производства им наблюдений и ведения записей; 2) подробный осмотр состояния водомерного поста (свай, реек, реперов и пр.); 3) определение при помощи нивелировки отметок свай, реек, реперов и опорных высотных точек; 4) устранение обнаруженных дефектов.

Поверка должна производиться возможно чаще, без предупреждения наблюдателя, не реже двух или, по крайней мере, одного раза в год; так как изменения в отметках свай и реек происходят большей частью во время весеннего половодья, то и поверку желательно приурочивать ко времени перед вскрытием реки (озера) и после прохода весенних вод. Результаты поверки должны быть записаны в полевой книжке и журнале, а также отмечены в техническом списке поста.

Ремонт поста заключается в исправлении обнаруженных повреждений и замене пришедших в негодность частей новыми. Если приходится заменить старую сваю поста новой, то она обязательно уничтожается, а если забиваются дополнительные сваи, то им даются новые номера, причем существующая нумерация не меняется, во избежание возникновения путаницы при дальнейших наблюдениях и обработке. Ненадежные, разрушающиеся репера, например на подмываемом берегу, также заменяются новыми, если нельзя принять мер к их сохранению и укреплению, но оставляются до естественного разрушения.

Если надо коренным образом перестраивать пост вследствие неудачного его местоположения, то лучше перенести его на новое место, причем последнее желательно выбрать так, чтобы падение реки между старым и новым постами было минимальное, не более 1—2 *см*, иначе говоря, желательно новый пост установить рядом со старым. В противном случае наблюдения на новом посту приходится рассматривать не как продолжение старых, а как наблюдения на совершенно новом посту, для которых должна быть установлена зависимость от показаний старого поста путем установления связи между ними (§ 17); для этого оба поста — старый и новый — должны функционировать некоторое время (не менее года) одновременно.

§ 14. Первичная обработка водомерных наблюдений. Колебания уровня воды, как одного из главных элементов режима вод, тесно связанного с ходом метеорологических элементов, обнаруживают, как уже указывалось, ясно выраженную годовую периодичность. Поэтому также естественно группировать и обрабатывать водомерные наблюдения по годовым циклам, которые можно подразделять на отдельные более мелкие части (зимний, весенний и летне-осенний периоды, вегетационный и невегетационный, навигационный и ненавигационный периоды). За начало *гидрологического года* принимается начало накопления влаги в бассейне в виде снежных запасов, которое наступает

у нас раньше на севере и позже на юге. В связи с этим, в разных частях Союза принято считать средним началом гидрологического года или 1 октября, или 1 ноября, или 1 декабря (первое число месяца из соображений удобства), хотя очень часто результаты водомерных наблюдений даются в рамках гражданского года, начинающегося 1 января. Конечно, самые методы обработки водомерных наблюдений во всех случаях остаются одни и те же.

Для всех типов водомерных постов, кроме свайного и смешанного реечно-свайного, отсчеты, производимые наблюдателем, представляют высоту уровня воды над нулем поста или наблюдений (в постах мостового типа — расстояние от нуля наблюдений, отмеряемое вниз, до уровня воды, а при соответствующей разметке — также высоту над некоторым воображаемым нулем). Для постов свайного и смешанного типов первый этап обработки поэтому заключается в *приведении* всех отсчетов *к нулю поста* или наблюдений. Для этого к каждому отсчету должна быть прибавлена высота головки сваи, на которую ставилась рейка, над сваей, головка которой принята за нуль поста. Эта операция производится или самим наблюдателем и только проверяется впоследствии, или при обработке полевой книжки и журнала в учреждении, в ведении которого пост находится.

Так как нуль наблюдений может изменять свое высотное положение (что обнаруживается и устанавливается поверками поста), а отсчеты высот уровня воды над ним будут сравнимы только при его неизменном положении, то в них, при изменении положения нуля поста, приходится вводить поправку, называемую *приводкой*, — положительную, если нуль поста поднялся, и отрицательную, если опустился. Таким образом, высоты уровней будут приводиться к горизонту или горизонтальной плоскости воображаемой, которая уже не связана на посту с реальной опорной точкой, — к так называемому *нулю графика* поста.

Из сказанного ясна разница между нулем наблюдений и нулем графика поста: первый есть реальная опорная точка наблюдений, высота которой может меняться с течением времени, в зависимости от разных обстоятельств (оседание или выпирание сваи, замена ее другой и т. п.), второй — неизменная горизонтальная плоскость, так сказать, *плоскость сравнения*, подобная такой же плоскости в графической интерпретации уравнения *Бернулли* в гидравлике. Как нулю поста или наблюдений, так и нулю графика поста могут быть приданы определенные высотные отметки (абсолютные или условные). Приводка равна нулю, если нуль наблюдений совпадает с нулем графика, вообще же ее величина переменна для разных периодов действия поста.

Введение в отсчеты высот уровня воды приводки, которая может иметь место для постов всех типов, составляет второй этап обработки наблюдений. К этому же этапу можно отнести перечисление отсчетов на посту мостового типа в высоты над нулем графика, который удобно назначить на высоте наинизшего возможного горизонта воды или, с запасом, еще несколько ниже.

С приводкой в только что определенной форме можно и не иметь дела, если перечислять все отсчеты, даваемые наблюдателем, сразу в отметки. Для этого на свайном посту нужно к отсчету прибавлять

отметку головки сваи, по которой сделано наблюдение, а на реечном — отметку нуля рейки. В постах мостового типа можно также оперировать с отметкой нуля наблюдений, вычитая из нее отсчет. Во всех случаях будут получаться соответствующие отсчетам отметки уровня воды. Однако, при этом получится неудобство в дальнейшем подсчете средних уровней (суточных, месячных и т. д.) вследствие введения лишнего числа цифр (если отметки выражаются числами с десятками и сотнями целых единиц), по существу же за нуль графика будет принят нуль отметок, а значит, в скрытой форме будет существовать и приводка.

Третий этап первичной обработки данных поста заключается в определении *средних высот уровней* за сутки (если наблюдения производились больше одного раза в день), месяц, год и по периодам.

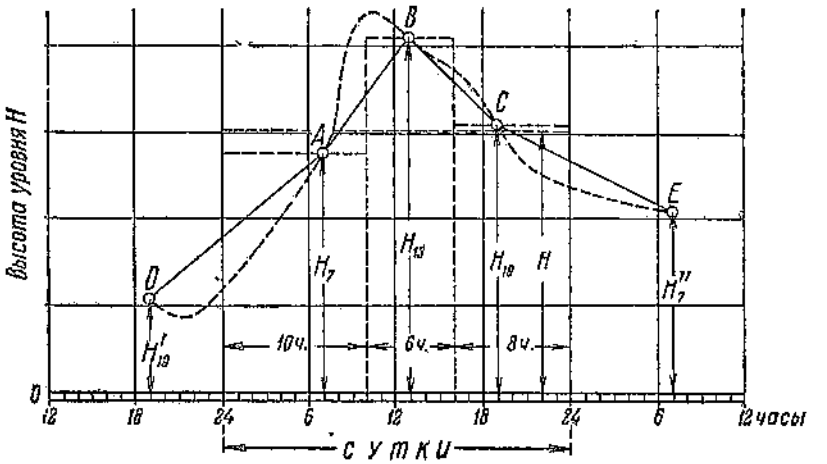


Рис. 36. Определение среднего суточного уровня.

Средний за сутки уровень обычно выводится как среднее арифметическое из всех сделанных за сутки наблюдений. При одном наблюдении в сутки это наблюдение и принимается за средний суточный уровень.

При желании, если колебания уровня за сутки значительны и нужно получить более точную величину среднего уровня, можно придать каждому наблюдению соответствующий вес, считая его средним за число часов, на которое оно распространяется.

Так, например, для наиболее частого случая трех наблюдений в сутки: в 7 ч. (утра), в 13 ч. (1 ч. дня) и 19 ч. 7 ч. вечера) — можно рассуждать следующим образом. Пусть в некотором масштабе (рис. 36) по горизонтальной оси отложены часы суток, а по вертикальной — высоты уровня воды над нулем графика H. Обозначим высоту уровня при утреннем наблюдении через H_7, при дневном H_{13} и при вечернем H_{19}, на чертеже им соответствуют точки A, B и C. Будем считать, что высота H_7 есть средний уровень за промежуток времени от начала суток (24 ч. предыдущего дня) до середины между утренним и следующим дневным наблюдениями, т. е. до 10 ч., H_{13} — средний уровень от 10 ч. до середины следующего интервала между наблюдениями, т. е. до 16 ч. (4 ч. дня), и H_{19} — средний уровень от 16 ч. до конца суток (24 ч.). Тогда утреннее

наблюдение распространяется на 10 часов, дневное на 6 часов и вечернее на 8 часов, и средний за сутки уровень

$$H = \frac{10H_7 + 6H_{13} + 8H_{19}}{24} = \frac{H_7 + H_{13} + H_{19}}{3} + \frac{H_7 - H_{13}}{12}, \qquad (6)$$

т. е. равен среднему арифметическому с некоторой поправкой, которая тем больше, чем больше разница высот уровня при утреннем и дневном наблюдениях.

Более правильно было бы считать, что утренний уровень распространяется назад не до начала суток, а тоже до середины промежутка времени между моментом его наблюдения и предшествующим (в 7 ч. вечера предыдущего дня, на рис. 36 точка D с высотой H'_{19}); тогда в расчет пришлось бы ввести еще вечернее наблюдение предыдущего дня, распространив его на 1 час и уменьшив множитель при H_7 до 9 часов.

Самое же правильное решение получится, если определить площадь, ограниченную в пределах данных суток ломаной линией $DABCE$ и осью абсцисс, и представить ее в виде равновеликого прямоугольника, имеющего то же основание (сутки), а высоту — равную искомой средней. Этим путем можно прийти к формуле

$$H = \frac{H_7 + H_{13} + H_{19}}{3} + \frac{H'_{19} - H_{13}}{12} + \frac{H''_7 - H_{19}}{24}, \qquad (7)$$

в которой приняты во внимание вечернее наблюдение предыдущего дня (H'_{19}) и утреннее последующего (H''_7).

При обработке *лимниграмм*, т. е. кривых, показывающих ход колебаний уровня, вычерчиваемых пером лимнографа, вычисление среднесуточных уровней делается тем же методом — путем отыскания высот равновеликих данной площади прямоугольников. Вся разница заключается в том, что на лимнограмме вместо ломаной линии $DABCE$ будет кривая, проходящая через те же точки (см. рис. 36), и вычисление ее площади удобнее делать планиметром или приближенно, пользуясь тем обстоятельством, что сумма площадей, расположенных выше горизонтальной линии, лежащей на искомой высоте H, должна равняться сумме площадей ниже горизонтальной линии, между ней и кривой.

При применении, наряду со срочными наблюдениями, автоматических минимальных и максимальных реек, дающих величины наинизшего уровня $H_н$ и наивысшего $H_в$ в промежутке времени между двумя срочными наблюдениями, за среднюю суточную высоту уровня принимается приближенно среднее арифметическое из всех отсчетов за сутки. Если наблюдения, например, производятся два раза в сутки, в 7 ч. и 19 ч., то в каждый срок имеются три отсчета: в 7 ч. — H_7 и два отсчета по автоматическим рейкам за предшествующий промежуток времени между срочными наблюдениями — $H_{н7}$ и $H_{в7}$, а в 19 ч. — H_{19}, $H_{н19}$ и $H_{в19}$. Тогда средняя высота уровня за сутки:

$$H = \frac{H_7 + H_{н7} + H_{в7} + H_{19} + H_{н19} + H_{в19}}{6}. \qquad (8)$$

Можно было бы, конечно, и для этих случаев ввести уточняющие поправки, руководствуясь соображениями, приведенными выше, и ходом колебаний уровня при переходе от предыдущих суток к данным и от данных к последующим, но на практике этого обычно не делается.

Средние уровни за месяц, год и любые периоды подсчитываются как среднеарифметические из средних суточных уровней за соответствующие дни. Среднегодовой уровень иногда подсчитывается приближенно по среднемесячным уровням, без учета неодинакового числа дней в разных месяцах.

Все обработанные таким образом уровни вносятся в *сводную таблицу* поста (см. приложение 4), где в особых графах выписываются также минимальные и максимальные уровни для каждого месяца и за весь год. Ледостав и ледоход обозначаются: первый — сплошной жирной чертой, проводимой параллельно цифрам уровней, или при

помощи общей жирной рамки, которой окаймляются высоты уровня при ледоставе, второй — пунктирной линией или условными значками.

На основании годовой таблицы поста составляется *график колебаний уровня* (рис. 37), дающий наглядную картину жизни реки (озера) за годовой период. Отдельные отрезки по времени этого графика, более детализированные, непосредственно получаются на лимнитрафном посту в виде лимнитрамм, о которых уже упоминалось.

По вертикальной оси графика откладываются высоты уровня воды над нулем графика поста (иногда отметки уровней), по горизонтальной — время, с разбивкой по дням и месяцам.

Масштабы выбираются такие, чтобы чертеж получился достаточно

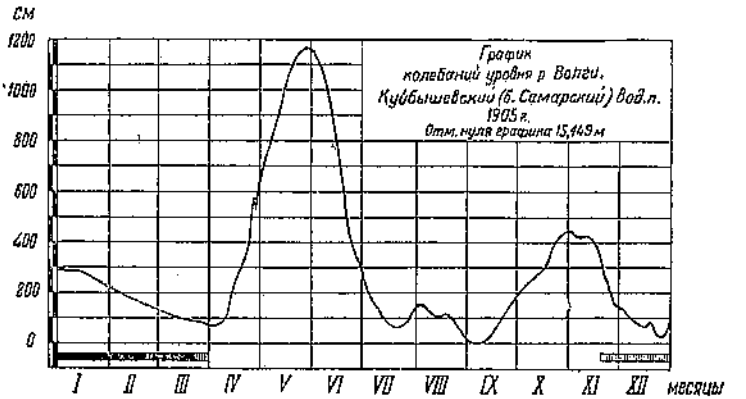


Рис. 37. График колебаний уровня.

ясным и точным. Кроме того, масштабы должны быть обязательно удобные для отсчетов, например: в 1 *см* 5, 10 дней или 10, 20, 25, 50 *см* (если график вычерчивается на миллиметровой бумаге). Иногда для таких графиков изготовляется специальная клетчатая бумага с готовой разбивкой на дни и месяцы; остается только установить масштаб уровней, сообразуясь с амплитудой их колебаний.

На графиках обязательно обозначаются ледоход и ледостав. Это можно делать, проводя под линией уровней или над ней горизонтальную полоску, сплошную во время ледостава и заштрихованную при ледоходе (рис. 37), или вычерчивая линию колебаний уровня при ледоходе пунктиром, а при ледоставе — жирной линией (см. рис. 39). Каждый график должен быть снабжен надписями с указанием реки (озера, канала и т. п.), поста, года и отметки нуля графика.

Иногда на одном чертеже совмещаются графики одного поста за ряд лет; тогда их приходится вычерчивать разными цветами или разными линиями (пунктирами), или соединяются графики ряда постов за один год (рис. 39).

§ 15. Статистическая обработка водомерных данных. Графики частоты и обеспеченности уровней. Вторичная статистическая обработка данных водомерного поста зиждется на результатах первичной

обработки, которые выражаются в сводных годовых таблицах и хронологических (рассмотренных в § 14) графиках колебаний уровня.

Подсчитаем число дней с уровнями, которые попадают в промежутки по высоте, например через 100 *см*, для данных по реке Волге у г. Куйбышева (б. Самары) за 1905 г., для которых приведена годовая таблица (приложение 4) и график колебаний уровня (рис. 37). Это можно сделать, пользуясь или таблицей или графиком. Пользуясь таблицей, удобно применять следующий статистический прием. Составив таблицу с разбивкой высот уровней по интервалам (промежуткам), будем проходить по годовой таблице все уровни подряд, отмечая каждый против того интервала, куда он попадает. Первые четыре уровня, приходящиеся в интервале, обозначим точками, расставленными по углам квадратика, вторые четыре — проводя по точкам стороны квадратиков, а девятый и десятый — проводя диагонали. Тогда каждый десяток будет изображаться полным квадратиком с двумя диагоналями, а остающиеся единицы — незаконченной фигуркой. Пройдя таким образом все уровни за год, нетрудно будет подсчитать, сколько их приходится на каждый интервал.

Так как уровни выражаются в целых сантиметрах, то, во избежание неопределенности при их рассортировке, включим в каждый интервал неперекрывающиеся значения — например от 1 до 100 *см* включительно, от 101 до 200 *см* и т. д. В результате получим следующую табличку:

Интервалы по высоте в *см*	Число уровней, попадающих в интервал		Последоват. суммы
1101—1200	⊠ ⌐	= 16	16
1001—1100	⊠	= 10	26
901—1000	⌐	= 6	32
801—900	□	= 8	40
701—800	∴	= 4	44
601—700	⊏	= 7	51
501—600	⌐	= 6	57
401—500	⊠ ⊠ ⊏	= 27	84
301—400	⊠ ⊠ .	= 21	105
201—300	⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⌐	= 66	171
101—200	⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ □	= 98	269
1—100	⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ⊠ ◪	= 89	358
—99—0	⊏	= 7	365

По этим данным *график частоты (повторяемости)* уровней строится следующим образом (рис. 38). По вертикальной оси наносится шкала уровней (такая же, как и на графике колебаний уровня — рис. 37), по горизонтальной — число дней в некотором масштабе или соответствующие ему проценты, которые получаются, если принять весь период (в данном случае год или 365 дней) за 100%. Против средних интервалов откладывается полученное в итоге для каждого интервала число дней, и точки соединяются между собой. Так как наивысший и наинизший уровни известны, то крайние интервалы получаются неодинаковые (при данной разбивке их), и естественно свести концы линии частоты на этих уровнях к нулю шкалы времени.

Полученный график или «*кривая распределения*» показывает, как часто встречались определенные уровни в течение рассматриваемого

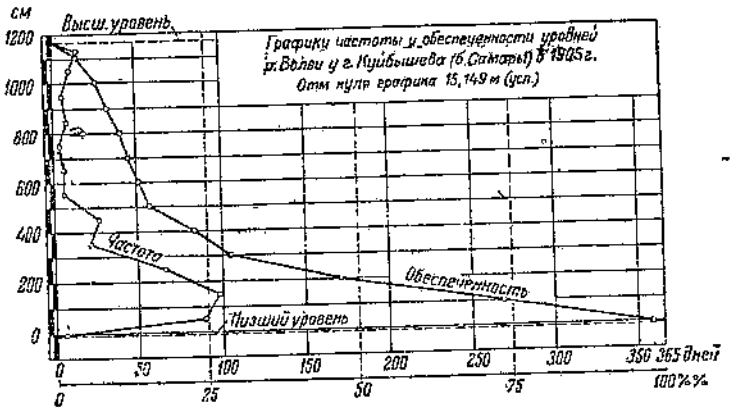


Рис. 38. Графики частоты и обеспеченности уровней.

периода (года). Из него, например, видно, что чаще всего уровень стоял на высоте от 100 до 200 *см;* более высокие и более низкие уровни встречались реже.

По тем же данным легко построить второй график (на том же чертеже) — *обеспеченности* или *продолжительности* уровней. Для этого надо найти последовательные суммы чисел дней, как это сделано в последнем столбце таблицы вычислений. Конечная сумма в то же время позволяет проверить подсчет, так как в итоге должно получиться число дней во всем периоде (365 дней). Любая из последовательных сумм показывает, что это число дней уровень стоял вообще выше нижней границы соответствующего интервала, т. е. можно сказать, что это число дней в году были обеспечены уровни не ниже этой границы, или, наконец, это число дней показывает продолжительность стояния уровня выше этого предела. Откладывая в тех же масштабах суммарную продолжительность, но уже не против середин интервалов, а против их нижних границ, как это следует из только что сказанного, получим линию или кривую обеспеченности или продолжительности стояния уровней, имеющую большое практическое применение в гидротехнике. Если установлена связь между уровнями и расходами воды в реке (см. гл. IV), то можно построить такие же

кривые частоты и обеспеченности расходов воды, а также (при других данных), например, напоров и мощностей гидроэлектростанции.

Кривые частоты и обеспеченности приобретают тем более плавный и закономерный характер, чем больший период наблюдений (например несколько лет) положен в основу подсчета, и являются, таким образом, одним из способов характеристики режима изучаемого элемента.

Кривая обеспеченности определяется, как видно, всецело кривой частоты. Если принять величину интервала (например уровня) за единицу, то каждая абсцисса кривой обеспеченности дает величину площади, заключенной между кривой частоты и осью ординат, кверху от этой абсциссы. Иначе говоря, кривая обеспеченности или продолжительности представляет *интегральную кривую* по отношению к кривой частоты.

Практически для построения обеих кривых нужно иметь достаточное число точек, например 10—15. В таком случае величину интервала можно определить сначала приближенно, исходя из полной амплитуды, а затем округлить до удобного числа и наметить границы интервалов. Решать ту же задачу можно и при помощи хронологического графика, отсчитывая на нем число дней, занимаемое его отрезками между горизонтальными линиями — границами намеченных интервалов, и затем суммируя полученные величины. Однако это не всегда удобно, не говоря уже о том, что основным материалом для подсчетов являются числовые таблицы, полученные в результате первичной обработки наблюдений.

§ 16. Характерные уровни. Кроме уже отмеченных средних и предельных (наинизших и наивысших) уровней, выводимых для разных периодов (например сутки, 5-дневие, декада, полумесяц, месяц, часть года, несколько лет), могут представлять специальный интерес с разных точек зрения еще другие *характерные уровни*, к которым можно отнести:

1) уровень половодья;
2) уровень весеннего ледохода:
   а) с затором льда,
   б) без затора;
3) уровень осеннего ледохода:
   а) с затором льда,
   б) без затора;
4) уровень паводка;
5) наинизший уровень за летне-осенний период (при отсутствии льда);
6) наинизший зимний уровень (при ледяном покрове);
7) «низкий промышленный» уровень (ниже которого уровень воды опускался только в течение 10 дней в году, иначе говоря — обеспеченный в течение 355 дней; см. кривую обеспеченности);
8) 9-месячный («промышленный») уровень (обеспеченный в течение 9 месяцев в году);
9) 6-месячный уровень;
10) уровень наибольшей частоты (см. кривую частоты) и т. д.

Если водомерные наблюдения имеются за ряд лет, то для каждого из перечисленных уровней можно определить его среднюю мно-

годётнюю величину *(норму)* и предельные значения: наинизшее и наивысшее.

Помимо того, некоторые уровни (1—6) желательно сопровождать указаниями о сроках их наступления: самом раннем, среднем, самом позднем. Для вычисления средних сроков, когда отдельные сроки падают на разные месяцы, приходится их приводить к одному месяцу — удобнее к более раннему, а затем уже вычислять среднее. Например, если уровень весеннего половодья приходится за 5 лет на такие сроки: 6 IV, 30 III, 26 II, 8 IV и 17 III, то, приводя все сроки к февралю (28 дней), получим: вместо 6 IV: $28+31+6=65$ II, вместо 30 III: $28+30=58$ II, вместо 8 IV: $28+31+8=67$ II, и вместо 17 III: $28+17=45$ II. Отсюда средний срок:

$$\frac{65+58+26+67+45}{5}=52 \text{ II, т. е. } 52-28=24 \text{ III.}$$

Кривая обеспеченности или продолжительности уровней также позволяет установить некоторые характерные уровни. Вообразим себе, что все уровни годовой таблицы, использованной для ее построения, представлены в виде столбиков соответствующей высоты (в избранном масштабе) с шириной основания в один день, которые поставлены в ряд в порядке убывания их высоты слева направо. Нетрудно сообразить, что вершины столбиков расположатся, образуя ту же кривую обеспеченности, которая уже построена, но только более детализированную, не столь сглаженную. Это и понятно: кривая нами построена по интервалам уровней через 100 *см*, при числе точек всего 13, теперь же каждый уровень будет давать точку для кривой, и число всех точек будет 365.

Уровень, стоящий в середине ряда (обеспеченный в 50% времени), а при четном числе всех уровней — средний арифметический из двух стоящих в середине уровней, называется *медианным уровнем* или просто *медианой*. По обе стороны от него находится одинаковое число членов ряда, причем все члены, расположенные влево от него, — больше его (или ближайшие равны ему), а члены, расположенные справа,—меньше его (или ближайшие равны ему). Считая промежутки между осями столбиков, найдем их число равным $n-1$ (если всех столбиков n). Число промежутков от оси первого столбика до середины ряда есть $\frac{n-1}{2}$, поэтому место медианы в ряде выражается формулой:

$$m=1+\frac{n-1}{2}. \qquad (9)$$

В нашем случае, при числе членов ряда $n=365$, $m=183$, т. е. медианой является 183-й член ряда. Если бы n равнялось 366, то $m=183\frac{1}{2}$, т. е. медиана равна среднеарифметическому значению величин 183-го и 184-го членов ряда. По графику рис. 38 видно, что медианный уровень M (50% обеспеченности) равен около 190 *см* (заметим, что он не совпадает с уровнем наибольшей частоты, который имеет высоту около 150 *см*). Более точно медианный уровень можно найти таким образом: как видно из последнего столбца таблицы на стр. 42, 183-й уровень в порядке убывания будет 12-м членом ряда ($183-171=12$) в интервале 101—200 *см*. Располагая уровни в этих

пределах (из годовой таблицы) в убывающем порядке, найдем, что медианный уровень $M = 181$ *см*. Этот уровень не совпадает также со среднеарифметическим годовым уровнем (294 *см*).

Медиана представляет важную характеристику ряда, являясь наиболее вероятным его членом. Только в том случае, если бы кривая частоты была симметричной (имела бы две совершенно одинаковые ветви по обе стороны от наибольшей частоты), медиана совпала бы со средним арифметическим и с уровнем наибольшей частоты (*модой*). Медиана лучше характеризует вероятную среднюю высоту уровня, чем среднеарифметическое его значение, так как на ее величине не отражаются случайные, редкие и исключительные подъемы и понижения уровня. В самом деле, представим себе, что в ряд уровней попадает исключительно высокий горизонт воды (во время прорыва плотины, ледяного затора и т. п.), случающийся раз во много лет. Этот горизонт отразится на среднеарифметическом уровне, введение же медианы позволит исключить такое случайное явление.

Разбивая тот же ряд на 4 равных части, получим еще два характерных уровня, называемых *квадрильяными* (или *квартильными*) уровнями — *нижний* и *верхний*. Это — средние члены каждой половины ряда (обеспеченные на 75 и 25%); между ними, около медианы, заключена половина всех членов ряда.

Формулы, показывающие место квадрильян, будут:
для верхней квадрильяны

$$k_1 = 1 + \frac{n-1}{4}. \qquad (10)$$

для нижней квадрильяны

$$k_2 = 1 + \frac{3(n-1)}{4}; \qquad (11)$$

Для периода в 365 дней $k_1 = 91$, $k_2 = 273$.

Если бы период равнялся 366 дням, то $k_1 = 91\frac{1}{4}$, $k_2 = 273\frac{3}{4}$. В этом случае к уровню, имеющему 91-й порядковый номер в ряде, пришлось бы прибавлять четверть разницы по высоте между 91-м и 92-м уровнями, а к 273-му — $\frac{3}{4}$ разницы между 273-м и 274-м.

На графике (рис. 38) верхний квадрильянный уровень $K_1 = 360$ *см*, нижний квадрильянный $K_2 = 100$ *см*. Более точно, так же, как и для медианы, можно было бы найти, что $K_1 = 371$ *см*, $K_2 = 98$ *см*.

Присоединяя к этим характеристикам предельные уровни (L_1 и L_2), получим для нашего годового ряда 5 характерных уровней:

$L_1 = 1163$ *см* (наивысший),
$K_1 = 371$ „ (верхний квадрильянный),
$M = 181$ „ (медианный),
$K_2 = 98$ „ (нижний квадрильянный),
$L_2 = -2$ „ (наинизший).

Иногда в дополнение к этим уровням вводятся еще некоторые другие, например уровень, обеспеченный в продолжение 10 и 90% всего периода (10-я и 90-я *перцентили*).

Ряды, подвергающиеся такой обработке (уровни, расходы воды и

др. элементы), могут охватывать любые по продолжительности периоды (месячный, многолетний); за основной же элемент по времени могут быть взяты не только среднесуточные величины, но и какие угодно другие (например, средние месячные, годовые, периодические максимумы и минимумы).

Стандартизация методов обработки не является до сих пор установленной окончательно как в смысле основных характеристик уровней, так и степени детальности обработки.

Границами средних уровней или «*средних вод*» за многолетний период принято считать уровни:
для нижней границы

$$\eta_1 = \frac{h'_{\min} + h_0}{2}, \tag{12}$$

для верхней

$$\eta_2 = \frac{h'_{\max} + h_0}{2}, \tag{13}$$

где $h'_{\min}$ — среднее арифметическое из годовых наинизших уровней,
$h'_{\max}$ — то же из наивысших уровней,
h_0 — среднее арифметическое из средних годовых уровней.

Оппоков предлагает более тесные границы:
для нижней

$$E_1 = \frac{h_0 h'_{\min} + h_0}{2}, \tag{14}$$

для верхней

$$E_2 = \frac{h_0 h'_{\max} + h_0}{2}. \tag{15}$$

Здесь $h'_{0\min}$ и $h'_{0\max}$ суть наименьшие и наибольшие величины из средних годовых уровней, h_0 — то же, что и в предыдущих формулах.

Для сравнения режима разных рек иногда высоты уровня выражаются в относительных единицах, так называемых *гидроградусах*, получаемых путем деления амплитуды колебаний уровня на 100 равных частей.

За нуль гидроградусной шкалы *Гравелиусом* принимается самый низкий уровень, за 100 градусов — самый высокий. Другие предлагают считать за нуль средний из низких уровней ($h'_{\min}$), за 100 градусов — средний из высоких ($h'_{\max}$); при этом уровни ниже $h'_{\min}$ имеют знак минус, а уровни выше $h'_{\max}$ выражаются числами более 100. Характерные уровни, пересчитанные на ту или другую шкалу, становятся сравнимыми между собой и независящими от высот нулей графика постов или величины абсолютных отметок уровней, что очень важно для возможности гидрологического сопоставления режима разных рек или одной реки в разных пунктах.

§ 17. Соответственные уровни. Изменения уровня воды в реке, наблюдаемые в каком-либо пункте и обусловленные в большинстве случаев колебаниями расходов воды вследствие переменного питания, распространяются вниз по течению. Благодаря этому графики колебаний уровня смежных водомерных постов, не слишком удаленных друг от друга, обнаруживают явное подобие и соответствие (рис. 39), тем большее, чем меньше расстояние между постами и влияние притоков и чем однообразнее русло.

Передача изменений уровня от вышележащих пунктов к нижележащим происходит с запозданием, зависящим от величины скоростей течения, расстояния между рассматриваемыми пунктами и характера колебаний уровня (быстроты подъема и спада). Самая величина колебаний уровня изменяется по пути вследствие неравномерного и неустановившегося движения.

Несмотря на сложность происходящих явлений, практически — с известным приближением — можно говорить о *соответственных* уровнях на смежных водомерных постах, определяя их значения из графиков колебаний уровня по характерным переломным точкам (вершины, впадины) и устойчивым стояниям уровней. Переломные точки позволяют определить и скорость продвижения вдоль реки соответственных уровней, — путем деления расстояния между постами на сдвиг точек по времени.

Эта скорость нормально тем больше, чем выше уровни, так как при этом возрастают расходы воды и увеличивается скорость течения, и для одних и тех же уровней должна быть больше во время подъема уровней, чем во время спада.

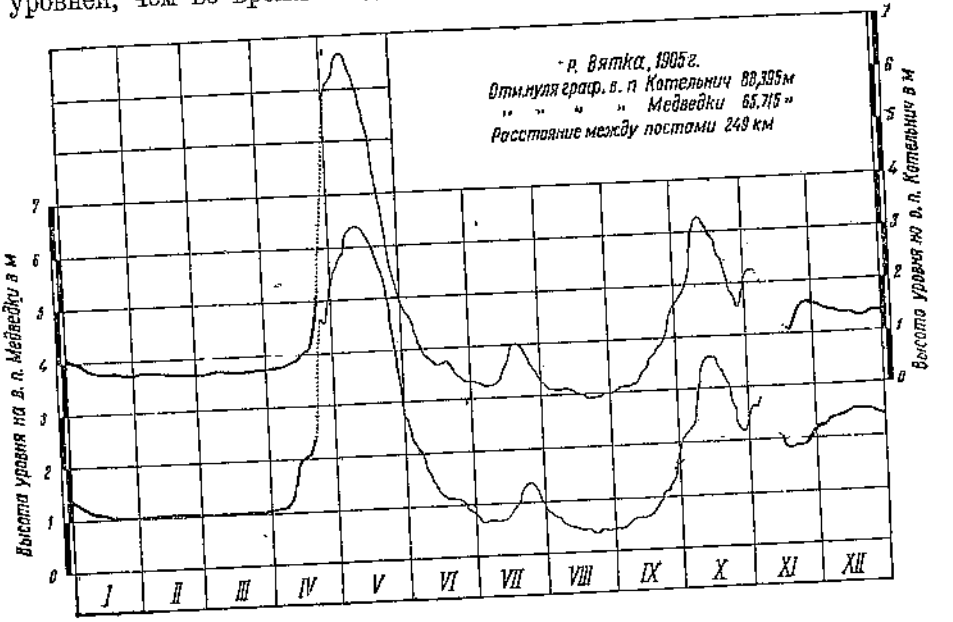


Рис. 39. Совмещенный график колебаний уровня двух постов.

Иногда бывает возможно построить кривые, связывающие *время пробега* (сдвиг) или скорость продвижения соответственных уровней с высотой уровня на одном из постов.

На практике большое значение часто имеет *связь соответственных уровней* на двух водомерных постах, которая строится так, как это показано на рис. 40.

Для близко расположенных водомерных постов связь уровней получается весьма точной и устойчивой. В этом случае время пробега обычно меньше промежутка между водомерными наблюдениями (сутки, полсуток), и за соответственные уровни можно принимать уровни, наблюдаемые на постах одновременно.

Если между постами в реку впадает крупный приток, нарушающий связь уровней, то иногда строится ряд кривых связи, каждая из которых отвечает определенному значению характеризующего состояние притока уровня или расхода. При этом для пользования такими

кривыми связи необходимо располагать указанными характеристиками притока.

Для установления соответственных уровней и их связи могут находить применение также кривые зависимости расходов от уровней (рассматриваемые в гл. IV), если они имеются для смежных постов, для которых известно также соотношение расходов.

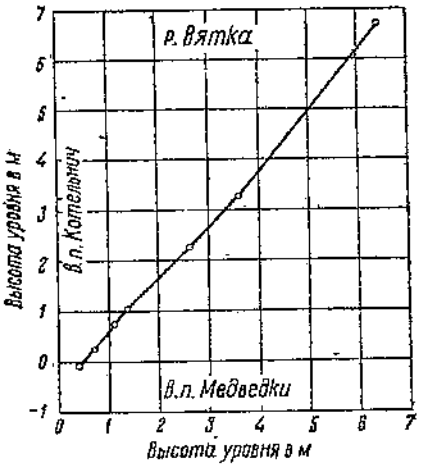


Рис. 40. Связь соответственных уровне й двух постов.

Установленная для открытого русла связь уровней обыкновенно нарушается в зимнее время благодаря ледовым процессам, а также вследствие изменений русла и возведения на реке сооружений. На озерах главным фактором, нарушающим соответствие уровней на водомерных постах, является ветер.

Соответственные уровни и связь между ними находят применение в разных случаях: для краткосрочных гидрологических *прогнозов* (предсказаний), восстановления уровней на одном посту по уровням на другом, длительно действующем посту, для контроля водомерных наблюдений, переноса кривой расходов и пр.

ГЛАВА II

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ

§ 18. Скорости течения в открытом русле. Измерение скоростей течения, обычно связанное с наиболее распространенными методами определения расхода воды, может в некоторых случаях преследовать и самостоятельные цели, например определение скоростей течения и их направления в плане в связи с нуждами судоходства и безопасностью плавания судов, устройством мостов и гидротехнических сооружений и т. п.

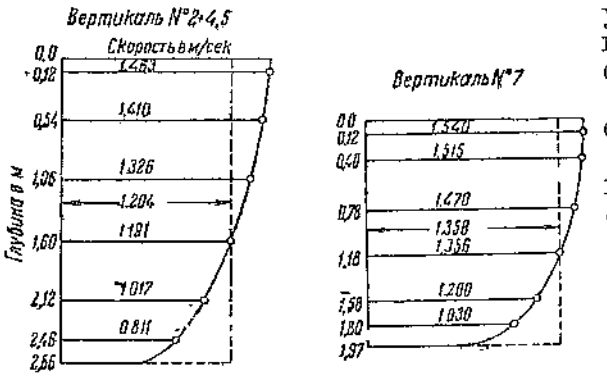


Рис. 41. Распределение скоростей по вертикали.

Движение воды в естественных потоках, изучаемое гидравликой и гидрологией, представляет чрезвычайно сложное, до сих пор недостаточно выясненное явление. Как величина скорости, так и ее направление непрерывно изменяются в каждой точке потока во времени и при переходе от одной точки к другой — в пространстве. Изменения во времени носят двоякий характер: *пульсации*, неразрывно связанной с турбулентностью движения, и изменений, зависящих от колебаний уровня, уклона и других причин. Наличность пульсации приводит к необходимости иметь дело с *осредненными местными скоростями*,[1] непосредственное измерение которых и составляет одну из основных задач гидрометрии.

Распределение скоростей по глубине или по *вертикали*, в плоскости, перпендикулярной к живому сечению потока, изображается *эпюрами*, наподобие представленных на рис. 41. Вследствие того, что

[1] Как известно из гидравлики, осредненная скорость при установившемся движении есть такая постоянная скорость, с которой через данную элементарную площадку живого сечения в течение некоторого промежутка времени должны были бы двигаться частицы жидкости, чтобы расход ее был равен тому расходу, каковой в действительности, в среднем за тот же промежуток времени, получается при переменных во времени мгновенных скоростях.

конструкция большинства приборов (вертушек) не позволяет измерить скорости на самой поверхности и у самого дна, кривую приходится продолжать на полную глубину путем экстраполяции.

Максимальная скорость обычно имеет место на самой поверхности (как на рис. 41) или несколько ниже ее (тогда кривая в верхней части загибается влево, рис. 44), минимальная — у дна.

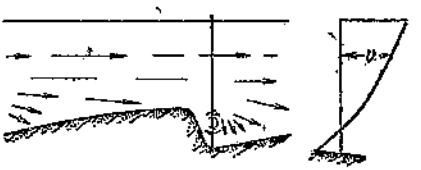


Рис. 42. Неправильное распределение скоростей по вертикали.

В общем случае можно считать, что скорости на вертикали являются функцией глубины, т. е.

$$v = f(h), \qquad (16)$$

однако вид этой функции зависит еще от многих местных обстоятельств — шероховатости русла, положения вертикали, продольного уклона потока, ветра, ледяного покрова и т. п. — и не поддается точному математическому выражению. Разными исследователями делались попытки подобрать наиболее подходящую форму кривой, для которой предлагались параболы разных степеней с горизонтальной и вертикальной осями, эллипс, гипербола, логарифмическая линия и другие кривые. Знание уравнения кривой позволило бы

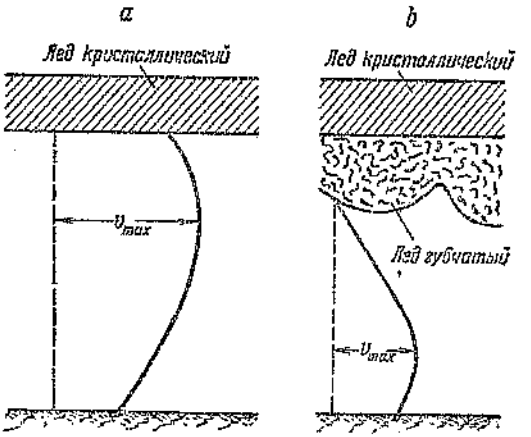


Рис. 43. Распределение скоростей по вертикали под ледяным покровом.

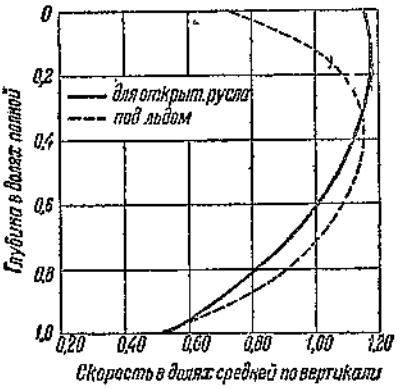


Рис. 44. Средние кривые распределения скоростей по вертикали.

строить эпюры скоростей, не прибегая к измерению их во многих точках, и легко находить величину средней скорости на вертикали (§ 19).

В зависимости от неровностей дна и общей конфигурации русла вид кривых может значительно искажаться (рис. 42). Точно так же кривые совершенно видоизменяются при наличии ледяного покрова, когда река течет как бы в трубе, причем большое влияние оказывает состояние нижней поверхности льда, которая может быть гладкой (при кристаллическом льде) и весьма неровной (когда под кристаллическим льдом есть слой губчатого «донного» льда). При этом положение максимальной скорости меняется в широких пределах (рис. 43).

На рис. 44 показаны средние из многочисленных наблюдений кривые распределения скоростей в открытом русле и подо льдом по данным американских наблюдений. По вертикальной оси отложены глубины в долях полной глубины, по горизонтальной — скорости в долях средней скорости на вертикали.

Построение эпюр распределения скоростей на вертикалях находит широкое применение при вычислении расходов по скоростям, измеренным в отдельных точках, о чем речь будет ниже (гл. III).

Распределение скоростей по ширине реки может быть представлено аналогичными графиками или эпюрами. К горизонтальной линии, изображающей ширину реки в некотором масштабе, восстанавливаются перпендикуляры, на которых откладываются величины ско-

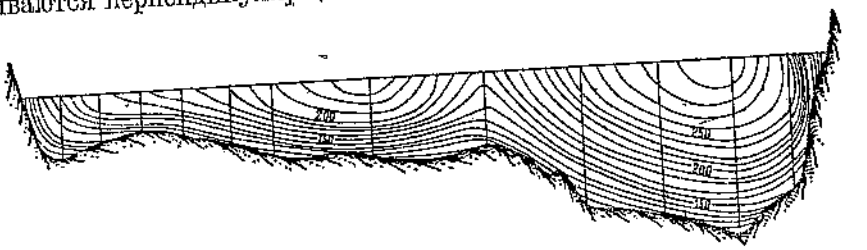


Рис. 45. Изотахи в открытом русле.

ростей, а через концы их проводится плавная кривая, сходящая на нуль у берегов (урезов воды).

Такие эпюры распределения скоростей по ширине потока строятся также при обработке расходов по средним скоростям на вертикалях и часто по поверхностным скоростям (при обработке расхода, измеренного поплавками). Можно их строить и для других скоростей, например донных или на определенных глубинах. В общем, эти эпюры обнаруживают уменьшение скоростей к берегам и имеют очертание, тесно связанное с формой поперечного сечения русла и его рельефом в плане.

Весьма наглядное представление о распределении скоростей в плоскости поперечного сечения дают проведенные на основании измерений в отдельных точках *линии равных скоростей* — *изотахи* (рис. 45 и 46). На этих рисунках отчетливо видно положение динамической оси потока (линии наибольших скоростей в пересечении с плоскостью чертежа) и влияние на распределение скоростей шероховатости русла, его очертания и ледяного покрова.

В естественных потоках с непризматическим руслом, строго говоря, не может существовать параллельноструйного движения. Винтообразные траектории частиц, «*сбойные*» и «*вероообразные*» течения, всякого рода водовороты — всегда присущи в той или иной мере всякой реке. При таких условиях только с известной натяжкой можно говорить о плоском *живом сечении*, перпендикулярном к «среднему» направлению течения реки. Как будет видно ниже, существуют особые конструкции приборов, позволяющие определять направление скоростей на глубинах. *Делявским* при специаль-

ных исследованиях на рр. Днепре и Десне еще в 1893—1894 гг. наблюдались отклонения от среднего направления течения в горизонтальной плоскости до 78°, а в вертикальных плоскостях до 18° вверх и 26° вниз.

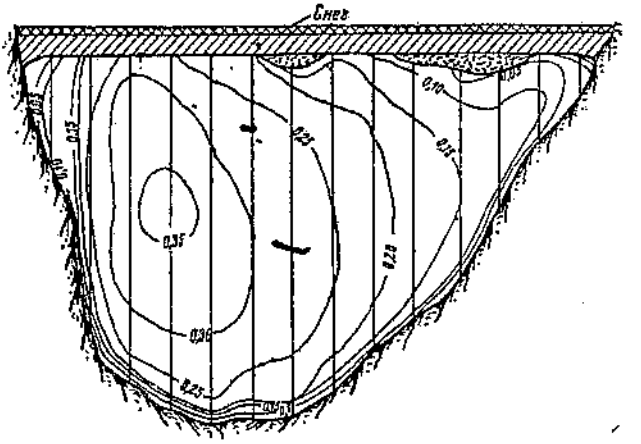


Рис. 46. Изотахи при наличии ледяного покрова.

§ 19. Средняя скорость на вертикали. Под *средней скоростью на вертикали* v_v понимается среднее арифметическое из скоростей во всех точках вертикали, если представить себе, что они измерены на бесконечно близких расстояниях. Иначе говоря,

$$v_v = \frac{\int_0^H v dh}{H} = \frac{\Omega_v}{H}, \qquad (17)$$

где H есть высота эпюры скоростей (полная глубина вертикали при открытом русле или расстояние от нижней поверхности льда до дна). Таким образом, средняя скорость равна площади эпюры скоростей Ω_v, разделенной на ее высоту, или ширине равновеликого с эпюрой прямоугольника той же высоты (рис. 41).

Если знать наперед форму кривой распределения скоростей по вертикали, то, очевидно, можно знать и ту глубину h_v, на которой скорость равна как раз средней. Это позволило бы ограничиться измерением только в одной точке для получения нужного результата, вместо того, чтобы строить кривую по нескольким точкам (обычно 5), а затем вычислять v_v. Однако в предыдущем параграфе мы уже видели, что на вид кривой влияют многие местные факторы, которые трудно поддаются учету. К ним относятся, помимо ледяного покрова и неровностей дна, трение воды об атмосферу, влияние ветра, уклон водной поверхности, вихри, несомые водой взвешенные вещества, химический состав и температура воды и пр., так что трудно говорить об общем законе изменения скорости по вертикали. Лишь за период времени, когда можно считать, что главные из упомянутых факторов действуют постоянно, возможно искать закономерность

в распределении скоростей, которая будет иметь место лишь для данных условий. Все же, как указывалось, такие попытки для обычных, «нормальных» условий делаются и дают практически приемлемые результаты.

В последнее время для открытого русла предпочтение отдается логарифмическим кривым и параболам (5—8-й степени) с вертикальной осью.

По *Ясмунду* (1893 г.).

$$v = a + b \lg y, \tag{18}$$

где a и b — постоянные для данной кривой коэфициенты, а y — вертикальное расстояние, отсчитываемое от дна вверх (рис. 47-а).

Коэфициенты a и b определяются из двух уравнений вида (18) по значениям v и y, взятым для двух произвольных точек на вертикали. При этом для средней скорости $v = v_0$ значение y получается $y = 0{,}368H$, т. е. скорость, равная средней, находится на глубине $h = 0{,}632H$ от поверхности.

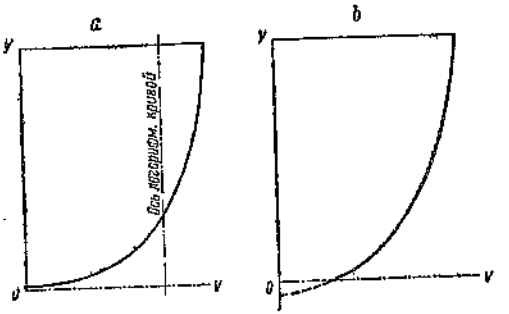


Рис. 47. Логарифмические кривые.

Основной недостаток формулы (18) тот, что при $y = 0$ получается $v = -\infty$, и кривая пересекает вертикаль немного выше дна. Между тем, скорость вблизи дна, вообще говоря, не должна равняться нулю и тем более отрицательной величине, что следует из факта движения так называемых донных наносов (песка, гравия, камней) и песчаных волн по дну реки.

Другая формула *Ясмунда* имеет вид:

$$v = a + b \lg (y + c) \tag{19}$$

и лишена этого недостатка (рис. 47-b); однако определение трех входящих в нее коэфициентов производится весьма сложным и искусственным путем. Некоторые исследования показывают, что в общем она дает даже худшие результаты, чем более простая формула (18).

Лучшие результаты получил *Моисеенко* (1912 г., применяя уравнение:

$$y = a + b \lg (B - v), \tag{20}$$

для которого коэфициенты a, b и B легко определяются, если взять три точки на вертикали, расположенные произвольно, но на равных расстояниях одна от другой.[1]

---

[1] Обозначая скорости в этих точках через v_1, v_2 и v_3, возвышения их над дном y_1, y_2 и y_3 и разность высот $\delta = y_1 - y_2 = y_2 - y_3$, получим:

$$B = \frac{v_1 v_3 - v_2^2}{v_1 + v_3 - 2v_2}, \tag{21}$$

$$b = \frac{\delta}{\lg \dfrac{v_1 - v_2}{v_2 - v_3}}, \tag{22}$$

$$a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 - b \lg [(B - v_1)(B - v_2)(B - v_3)]}{3}. \tag{23}$$

Общее уравнение параболы m-ой степени с осью, совпадающей с вертикалью, и вершиной на дне потока может быть написано так:

$$v = A\sqrt[m]{H-h}\,. \tag{24}$$

При $h=0$ поверхностная скорость

$$v_0 = A\sqrt[m]{H}\,,$$

поэтому

$$v = v_0\sqrt[m]{1-\frac{h}{H}}\,. \tag{25}$$

Площадь эпюры

$$\Omega_v = \int_0^H v\,dh = \int_0^H v_0\sqrt[m]{1-\frac{h}{H}}\,dh = v_0 H\frac{m}{m+1},$$

откуда

$$v_v = \frac{\Omega_v}{H} = v_0\frac{m}{m+1}\,. \tag{26}$$

Если средняя скорость лежит на глубине $h=h_v$, то, согласно (25),

$$v_v = v_0\sqrt[m]{1-\frac{h_v}{H}}\,.$$

Сравнивая это выражение с (26), находим:

$$\frac{h_v}{H} = 1-\left(\frac{m}{m+1}\right)^m. \tag{27}$$

Такие параболы имеют уже вышеотмеченный недостаток (при $h=H$, $v=0$), однако при высоких степенях скорость у дна возрастает весьма быстро, что хорошо согласуется с новейшими воззрениями в гидравлике (идеи *Прандтля*) и делает эти кривые практически приемлемыми.

При разных значениях степени m относительная глубина $\frac{h_v}{H}$, вычисленная по формуле (27), получается:

m	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{h_v}{H}$	0,556	0,578	0,590	0,598	0,603	0,607	0,610	0,613	0,614

Она лежит, таким образом, в весьма тесных пределах 0,56—0,61, что хорошо согласуется с практикой.

Выстраивая, как это делает *Отт*, параболы разных степеней, отнесенные к $H=1$ и $v_v=1$ (рис. 48), замечаем, что они пересекаются как бы в одном узле (на самом деле — в различных, но близких точ-

ках). Отсюда можно вывести приближенное соотношение для любого m в пределах от 4 до 12:

$$v_{0,58H} = 1{,}01 v_v,$$

т. е.

$$v_v = 0{,}99\, v_{0,58H} \tag{28}$$

($v_{0,58H}$ обозначает скорость на глубине $h = 0{,}58H$) или, с достаточной для практики точностью,

$$v_v = v_{0,6H}, \tag{29}$$

что, как видно из таблицы, близко соответствует параболам 4—8-й степени. (В дальнейшем будем для сокращения писать $v_{0,6}$ вместо $v_{0,6H}$, как и в аналогичных случаях.)

Определить степень параболы m можно путем построения так называемой *логарифмической анаморфозы*. Из уравнения (25) получаем:

$$\lg v = \lg v_0 + \frac{1}{m} \lg\left(1 - \frac{h}{H}\right), \tag{30}$$

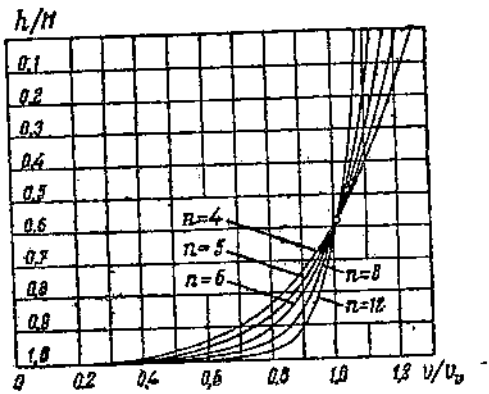


Рис. 48. Параболы разных степеней (по Отту).

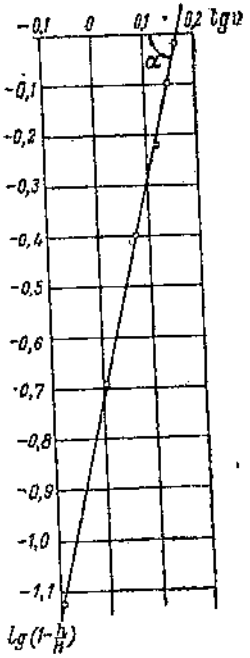


Рис. 49. Логарифмическая анаморфоза.

т. е. уравнение прямой линии, связывающей $\lg v$ и $\lg\left(1 - \frac{h}{H}\right)$.

Откладывая на обыкновенной клетчатке по вертикальной оси значения $\lg\left(1 - \frac{h}{H}\right)$, а по горизонтальной $\lg v$, или на логарифмической клетчатке значения $\left(1 - \frac{h}{H}\right)$ и v для нескольких точек, проводим через последние среднюю прямую линию. Тангенс угла наклона ее α к оси $\lg v$ (или v) равен m (рис. 49). Значение A можно найти, как среднее для тех же точек, из уравнения (24).

Например, для эпюры скоростей, изображенной на рис. 41 (р. Сыр-Дарья, ст. Запорожская, вертикаль № 2 + 4,5 с., измерения 1915 г.), вычисления (сделанные на логарифмической линейке) приведены в следующей таблице:

h	v	$\frac{h}{H}$	$1-\frac{h}{H}$	$\lg v$	$\lg\left(1-\frac{h}{H}\right)$	$H-h$	$\sqrt[4]{H-h}$	A	$1{,}18\sqrt[4]{H-h}$
0,12	1,463	0,045	0,955	0,165	—0,019	2,54	1,262	1,16	1,490
0,54	1,410	0,203	0,797	0,149	—0,098	2,12	1,206	1,17	1,423
1,06	1,326	0,398	0,602	0,122	—0,220	1,60	1,125	1,18	1,328
1,60	1,191	0,601	0,399	0,076	—0,399	1,06	1,015	1,17	1,198
2,12	1,017	0,796	0,204	0,007	—0,690	0,54	0,857	1,19	1,012
2,46	0,811	0,925	0,075	—0,091	—1,124	0,20	0,669	1,21	0,790
								7,08	

По данным 5-го и 6-го столбцов построена логарифмическая анаморфоза (рис. 47), из которой находим:

$$m = \operatorname{tg}\alpha = 4{,}3.$$

Принимая для удобства вычислений m равным 4, имеем из формулы (24):

$$A = \frac{v}{\sqrt[4]{H-h}}.$$

Для определения A служат в таблице столбцы 7—9. Среднее значение A:

$$A = \frac{7{,}08}{6} = 1{,}18.$$

Следовательно уравнение параболы

$$v = 1{,}18\sqrt[4]{2{,}66-h}.$$

По этому уравнению вычислен последний столбец таблицы, цифры которого можно сравнить с действительно измеренными скоростями. Для первой точки разница составляет меньше 2%, для последней — 2,5%; для остальных точек отклонения получаются еще меньше. Скорость на поверхности получается:

$$v_0 = 1{,}18\sqrt[4]{2{,}66} = 1{,}507 \text{ м/сек},$$

а средняя скорость по уравнению (26):

$$v_v = v_0\frac{m}{m+1} = 1{,}507 \cdot 0{,}8 = 1{,}206 \text{ м/сек}.$$

Средняя скорость, определенная точным планиметрированием эпюры [по формуле (17)], равна 1,204 *м/сек*.

Колупайло, исследуя связь между показателем m и шероховатостью русла, предлагает для определения m такую приближенную зависимость:

$$m = \frac{0{,}150}{n}, \tag{31}$$

где n — коэффициент шероховатости, входящий в формулу *Гангийе* и *Куттера* для коэффициента *Шези* C (см. § 54). Здесь учтен только один из факторов, влияющих на кривую распределения скоростей по вертикали.

Определение площади эпюры скорости (для нахождения v_v), если таковая построена по точкам, полученным измерениями, помимо планиметрирования («*графомеханический способ*»), может быть сде-

лано *«графоаналитическим способом»*, путем разбивки площади эпюры горизонтальными линиями на части, которые могут быть приближенно приняты за трапеции. Величина горизонтальных сторон трапеций (v_0, v_1, v_2 и т. д.) берется по масштабу с эпюры. Если разделить высоту эпюры H на n равных частей, например на 10, и обозначить каждую через Δ, то площадь эпюры:

$$\Omega_v = \Delta\left(\frac{v_0}{2} + v_1 + v_2 + \ldots + v_{n-1} + \frac{v_n}{2}\right), \qquad (32)$$

т. е. равна полусумме поверхностной и донной скоростей, сложенной с промежуточными скоростями и умноженной на высоту трапеции.

Удобнее задать Δ круглым числом (например 0,1; 0,2 *м*), тогда нижняя трапеция получится, вообще говоря, другой высоты $\Delta' < \Delta$, и площадь

$$\Omega_v = \Delta\left(\frac{v_0}{2} + v_1 + v_2 + \ldots + v_{n-2} + \frac{v_{n-1}}{2}\right) + \frac{v_{n-1} + v_n}{2}\Delta'. \qquad (33)$$

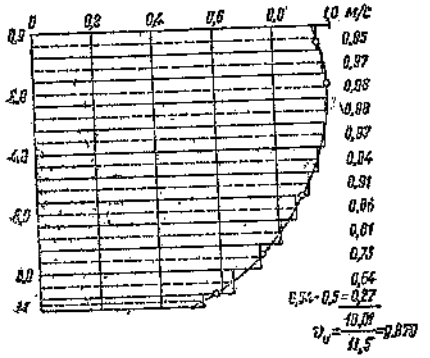


Рис. 50. Подсчет средней скорости по прямоугольникам.

Легко сообразить, что площадь эпюры, вычисленная по этим формулам, будет получаться всегда несколько меньше, чем истинная площадь криволинейной выпуклой эпюры. Разница будет тем меньше, чем больше число трапеций и чем меньше кривизна эпюры.

Еще удобнее *стандратный метод*, рекомендуемый инструкцией Государственного гидрологического института (1931 г.). Вся эпюра, как и в предыдущем случае, начиная сверху, делится на горизонтальные полоски равной высоты Δ (на рис. 50 — сплошные линии). Высота нижней n-ой полоски $\Delta' = k\Delta$, *причем* $k < 1$.

Посередине высоты каждой полоски проводятся горизонтальные линии (пунктирные), по которым отсчитываются и выписываются справа значения соответствующих скоростей. Таким образом эпюра заменяется совокупностью прямоугольников, а ее площадь

$$\Omega_v = \sum_1^{n-1} \Delta v_i + k\Delta v_n = \Delta\left(\sum_1^{n-1} v_i + k v_n\right). \qquad (34)$$

Высота эпюры

$$H = (n-1)\Delta + k\Delta$$

и средняя скорость

$$v_v = \frac{\sum_1^{n-1} v_i + k v_n}{n - 1 + k}. \qquad (35)$$

В это выражение глубина не входит. Для вычисления расходов воды (§ 49) эпюры строятся на миллиметровой бумаге. Масштаб глу-

бины выбирается с таким расчетом, чтобы максимальная высота эпюр была около 10 *см*. Высота прямоугольников берется на чертеже равной 4 *мм*, а высота нижнего неполного прямоугольника округляется до целых миллиметров, тогда для k получаются лишь три практически возможных значения: ¼, ½ и ¾. Сплошные горизонтальные линии обычно не проводятся.

Приближенно средняя скорость может быть вычислена по формуле *Чебышева:*

$$v_v = \frac{v_{0,08} + v_{0,31} + v_{0,50} + v_{0,69} + v_{0,92}}{5}. \qquad (36)$$

С этой целью строится эпюра скоростей на миллиметровке или на специальной сетке, которая обычно печатается в журналах для определения расходов воды вертушкой (приложение 6). На ней глубины выражаются в долях полной глубины и проведены жирные линии на глубинах, соответствующих скоростям в формуле *Чебышева.*

Без построения эпюр, при обычном методе измерения скоростей в 5 точках на вертикали (у поверхности, на $0{,}2H$, $0{,}6H$, $0{,}8H$ и у дна), применяются формулы:

Симпсона:

$$v_v = 0{,}050\, v + 0{,}347\,(v_{0,2} + v_{0,6}) + 0{,}173\, v_{0,8} + 0{,}083\, v_{1,0}, \qquad (37)$$

Мелентьева:

$$v_v = 0{,}049\, v_0 + 0{,}344\,(v_{0,2} + v_{0,6}) + 0{,}171\, v_{0,8} + 0{,}082\, v_{1,0} \qquad (38)$$

или *Котеса* (если получена измерением или взята с эпюры еще скорость на глубине $0{,}4H$):

$$v_v = 0{,}066\,(v_0 + v_{1,0}) + 0{,}260\,(v_{0,2} + v_{0,8}) + 0{,}174\,(v_{0,4} + v_{0,6}). \qquad (39)$$

Все они по точности примерно равноценны.

Нередко применяется немного менее точная, но зато более простая формула:

$$v_v = 0{,}1\,(v_0 + 3v_{0,2} + 3v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{1,0}). \qquad (40)$$

Во всех приведенных формулах вместо v_0 и $v_{1,0}$ подставляются скорости, измеренные близ поверхности и дна.

Другие приближенные способы определения средней скорости не требуют вовсе построения эпюры, основываясь на измерении скоростей в 1—3 точках вертикали. Тот факт, что в открытом потоке средняя скорость близка к скорости на 0,6 глубины (29), был давно известен исследователям и использовался в гидрометрии как основание *«одноточечного способа»* определения средней скорости на вертикали.

Американцы *Хойт* и *Гровер* (1907 г.) проверили его на 1605 эпюрах скоростей, полученных на разных реках с глубинами от 0,3 до 11,0 *м*, и нашли, что он в среднем прекрасно подтверждается. Наибольшие отклонения от формулы (29) в отдельных случаях не превосходили 5—6%.

Еще лучшие результаты дает *«двухточечный способ»:*

$$v_v = \frac{v_{0,2} + v_{0,8}}{2}, \qquad (41)$$

который также был проверен вышеупомянутыми исследователями на 695 кривых и дал отклонения, не превосходящие 3%.

Формула (41) замечательна в том отношении, что пригодна для определения средней скорости и при ледяном покрове.[1] *Мошевенко* в 1913 г. проверил ее на 500 эпюрах при наличии льда, взятых без выбора из работ трех гидрометрических станций, и нашел, что погрешность превысила 5% только в 70 случаях, составляя в среднем около 1,5%.

При «*трехточечном способе*» наиболее употребительной является формула:

$$v_v = \frac{v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8}}{4}, \qquad (42)$$

получаемая как следствие формул (29) и (41). Эта формула весьма широко применяется, хотя, казалось бы, точность, даваемая ею, должна быть средней между формулами (29) и (41), т. е. ниже, чем для формулы (41). Однако кривые распределения скоростей по вертикали далеко не всегда имеют правильный и плавный характер, и в этих случаях применение трехточечного метода может иметь смысл.

По данным Гостинотольской гидрометрической станции на р. Волхове (1914—1922 гг), из 1076 кривых получены следующие средние значения отношений действительной средней скорости к вычисленной по формулам:

по формуле (29) : 0,979 (отклонения до 14%),
» » (41) : 0,994 (» » 6%),
» » (42) : 0,985 (» » 7%).

Таким образом, если формула (41) дала в среднем наилучший результат, то по величине отклонений на первом месте оказалась формула (42).

Большой практический интерес представляет связь между средней скоростью на вертикали и поверхностной:

$$v_v = kv_0, \qquad (43)$$

которая, по существу, относится также к одноточечному методу. Коэфициент k, завися от вида кривой распределения скоростей и, главным образом, от ее верхней части, является величиной весьма переменной. На него влияют: глубина вертикали, величина скорости, продольный уклон потока, ветер, шероховатость русла, ширина потока, положение вертикали и пр.

Хойт и *Гровер* из 1535 кривых получили, что он колеблется в пределах от 0,78 до 0,98 и в среднем равен 0,85—0,87 (для неглубоких потоков с каменистым руслом 0,84).

По данным Гостинопольской станции на р. Волхове, из 1076 кривых было найдено среднее значение $k = 0{,}845$, при колебаниях от 0,66 до 1,09 (без отбора коэфициентов, определенных при ветре). Для отдельных вертикалей средние значения k получились от 0,783 до 0,880.

Вагнер из 100 кривых для Рейна, Дуная, Эльбы и др. рек вывел среднее $k = 0{,}838$ (при колебаниях от 0,64 до 0,97). *Брюнинг* нашел для Нижнего Рейна $k = 0{,}915$. *Хаген* полагал $k = 0{,}86$, *Риттер* 0,85. Другие исследователи дают для коэфициента k выражения зависящие от v_0 (*Пронн*) или глубины H (*Шлихтинг*), или иные формулы, а некоторые высказываются вообще против возможности установить для него какую-либо определенную зависимость.

---

[1] Напомним, что в этом случае глубина вертикали H считается от нижней поверхности льда до дна.

Если принять предложенную *Колупайло* приближенную формулу (31), то, из (26)

$$k = \frac{m}{m+1} = \frac{0{,}15}{0{,}15+n}, \tag{44}$$

где m — степень параболы, выражающей распределение скоростей по вертикали, а n — коэфициент шероховатости русла по *Гангийе* и *Куттеру* (§ 54).

Обычно среднее значение коэфициента k принимается 0,85.[1]

Кроме вышеприведенных наиболее употребительных формул для средней скорости по вертикали, иногда встречаются еще следующие:

а) при одноточечном методе:

$$v_v = v_{s/_8} = v_{0{,}625}, \tag{47}$$

$$v_v = v_{0{,}5}; \tag{48}$$

при ледяном покрове:

$$v_v = 0{,}85\ v_{0{,}5}; \tag{49}$$

б) при двухточечном методе:
формулы *Отта:*

$$v_v = \frac{v_{1/_6} + v_{s/_6}}{2}, \tag{50}$$

$$v_v = \frac{v_{0{,}18} + v_{0{,}82}}{2}; \tag{51}$$

формула *Кеннигэма:*

$$v_v = \frac{3v_{1/_6} + 4v_{s/_4}}{7}; \tag{52}$$

формулы *Гауса:*

$$v_v = \frac{v_{0{,}21} + v_{0{,}79}}{2}, \tag{53}$$

$$v_v = \frac{v_0 + 3v_{0{,}667}}{4}; \tag{54}$$

при ледяном покрове инструкция Средне-Азиатского опытно-исследовательского института водного хозяйства рекомендует формулу:

$$v_v = \frac{v_{0{,}1} + v_{0{,}7}}{2}; \tag{55}$$

в) при трехточечном методе:
формула *Кеннигэма:*

$$v_v = \frac{2v_{1/_4} - v_{1/_2} + 2v_{3/_4}}{3}; \tag{56}$$

формула *Гауса:*

$$v_v = \frac{5v_{0{,}113} + 8v_{0{,}5} + 5v_{0{,}887}}{18}; \tag{57}$$

---

[1] По *Прони* (для широкого русла):

$$k = \frac{v_0 + 2{,}372}{v_0 + 3{,}153}, \tag{45}$$

по *Шлихтингу:*

$$k = \frac{1 + 0{,}2676\sqrt{H}}{2 + 0{,}4014\sqrt{H}} \tag{46}$$

(Обе формулы для метрических мер.)

формулы, приводимые в американских руководствах [сверх формул (29), (41) и (42)]:

$$v_v = \frac{v_0 + 2v_{0,5} + v_{1,0}}{4}; \tag{58}$$

$$v_v = \frac{v_0 + 4v_{0,5} + v_{1,0}}{6}, \tag{59}$$

и этого же типа [(58) — (59)] формулы при подстановке в них в том же порядке скоростей:

$$v_{0,2},\ v_{0,6} \text{ и } v_{0,8} \text{ или } v_{0,15},\ v_{0,5} \text{ и } v_{0,85}.$$

§ 20. Классификация приборов для измерения скоростей. По принципу действия приборы, употребляющиеся для измерения скоростей, могут быть разделены на 4 основных класса:

1) *поплавки,*
2) *вертушки,*
3) *батометры,*
4) *динамометры.*

Первые передвигаются вместе с водой, и при их помощи скорость течения определяется измерением длины пройденного пути L и соответствующего промежутка времени T:

$$v = \frac{L}{T}. \tag{60}$$

Эти наиболее простые приборы могут быть подразделены на 3 типа:

а) *точечные* поплавки (поверхностные и глубинные),

б) *вертикальные* поплавки (гидрометрические шесты и поплавки-интеграторы),

в) *профильные* поплавки (ширма *Андерсона,* «солевой экран»), в зависимости от того, какие скорости измеряются ими в осредненном по длине потока живом сечении — в отдельных точках, средние по вертикали или средняя скорость для всего сечения.

Вертушки представляют собою приборы, имеющие *лопасти* (крылья), вращающиеся под действием течения со скоростью, зависящей от скорости течения. Непосредственному измерению подлежат: число оборотов лопастей N и соответствующий промежуток времени T. Мерилом скорости является среднее секундное число оборотов лопастей:

$$n = \frac{N}{T}, \tag{61}$$

связанное при помощи особого испытания (*тарировки*) со скоростями течения зависимостью:

$$v = f(n). \tag{62}$$

По расположению оси вращения вертушки делятся на 2 типа:

а) вертушки с горизонтальной осью,

б) вертушки с вертикальной осью.

Кроме того, по способу опускания вертушки разделяются на:

а) штанговые вертушки,

б) тросовые (подвесные) вертушки,

в) универсальные вертушки, приспособленные к опусканию и на штанге и на тросе.

Конструкции вертушек чрезвычайно разнообразны, так как вертушка в настоящее время является наиболее употребительным, совершенным и точным прибором для измерения скоростей в широких пределах от 5—10 *см/сек.* и до 12 *м/сек.*).

Батометры, под которыми обычно подразумеваются приборы для взятия проб воды на разных глубинах, также могут быть приспособлены для измерения скорости течения, от которой зависит объем воды W, поступившей в прибор за время T. Испытанием, подобным тому, которое производится для вертушек, определяется зависимость между скоростью течения и секундным количеством поступающей в прибор воды q:

$$q = \frac{W}{T}, \tag{63}$$

т. е. устанавливается вид функции:

$$v = f(q). \tag{64}$$

Приборы последнего класса, *динамометры,* основаны на измерении величин, связанных со *скоростным напором:*

$$h = \frac{v_0^2}{2g}. \tag{65}$$

(g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 *м/сек.*^{2}.)

Из них наибольшее применение, особенно в лабораторных условиях, находят *трубка Пито* и различные ее видоизменения и усовершенствования, употребляющиеся иногда и в полевых условиях. В трубке Пито измерению подлежит высота столбика воды (или другой жидкости), для которой также предварительным испытанием устанавливается ее связь со скоростью течения. Таким образом, в приборах этого типа отсутствует измерение времени, и пульсация, которая в приборах предыдущих классов исключается, главным образом, достаточной продолжительностью измерений, здесь отражается в значительной степени на показаниях прибора.

§ 21. Поверхностные и глубинные поплавки. Простейшего вида поверхностные поплавки представляют отпиленные от бревна диаметром 20—30 *см* цилиндрические кружки, высотой 3—7 *см*, снабженные для лучшей видимости флажком яркого цвета (рис. 51). Такими же поплавками могут служить бутылки, частью наполненные водой и закупоренные пробкой с цветной тряпочкой, пустотелые металлические шары, загруженные дробью или песком, куски дерева, льдины и т. п.

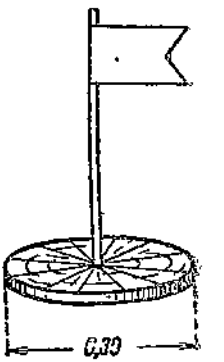


Рис. 51. Простой поверхностный поплавок.

На больших реках с малым уклоном, где скорости в поверхностном слое изменяются очень медленно, можно применять и более глубоко сидящие поплавки, бо́льших размеров, например показанные на рис. 52, состоящие из двух крестом соединенных досок размерами примерно 50 × 20 × 4 *см* с подвешенным внизу грузом — камнем, шесты диаметром около 6 *см* и длиной 50—100 *см* (рис. 53), тоже загруженные камнями, бочки из-под цемента и т. п.

Так как поплавки разной формы и при разной глубине погружения будут передвигаться все же с не совсем одинаковой ско-

ростью, то следует стремиться к применению однообразного типа поплавков. Особенно важно, чтобы поплавки представляли наименьшую поверхность, подверженную действию ветра, по возможности мало выдавались из воды и были бы не слишком тяжелыми, во избежание ускоренного движения. При применении шестов нужно следить за тем, чтобы их длина была только достаточной для того, чтобы они плыли в положении, близком к вертикальному. Если они сильно наклоняются вперед, то это указывает, что низ шеста попадает в слои с меньшими скоростями и шест уже не является поверхностным поплавком.

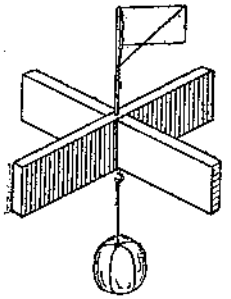


Рис. 52. Поплавок в виде креста

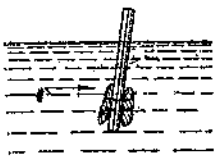


Рис. 53. Поверхностный поплавок-шест.

К поверхностным поплавкам относится также простейший *лаг*, состоящий из треугольной дощечки со сторонами в 25—30 *см*, к углам которой прикреплены три равной длины коротких бечевки, соединенных с длинной бечевой, разделенной узлами на части (рис. 54).

При измерении дощечка бросается в воду с моста или лодки, стоящей на якоре, и бечева разматывается до первого узла. Затем в момент отпуска бечевы делается отсчет по часам и второй отсчет через некоторый промежуток времени, примерно через минуту, на новом узле, когда бечева снова натянется. Одна из коротких бечевок легко зажата в щели дощечки и при сильном натяжении освобождается, позволяя снова без труда подтянуть дощечку к наблюдателю. Результат определения скорости течения получается не особенно точный. Более совершенные лаги, применяемые на судах, устраиваются на принципе вертушки.

Глубинные поплавки состоят из двух частей (рис. 55): верхнего поддерживающего поплавка, служащего в то же время видимым указателем, и нижнего, тонущего, прикрепленного нитью к верхнему и погруженного на определенную глубину. Если устроить верхний поплавок минимальных размеров по отношению к погруженному, то можно считать, что скорость поплавка-указателя и есть скорость на глубине h. Для этого, очевидно, необходимо также, чтобы нижний поплавок был только немного тяжелее воды. При работах на р. Миссисипи (в 1850-х годах), где глубины достигали 40 *м*, поплавки изготовлялись из доски с флажком, к которой на канате подвешивался боченок с дробью (рис. 55-*b*).

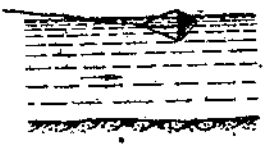


Рис. 54. Простейший лаг.

Применяются также двойные поплавки одинаковой формы и объема (рис. 55-*c*), общая скорость движения которых v может быть принята равной средней арифметической из скорости движения верхнего поплавка v_0 и нижнего v_h, если бы они двигались самостоятельно. Чтобы найти скорость на глубине h, пускаются поочередно сначала двойной поплавок, а затем — только поверхностный. Во втором случае он несколько загружается, чтобы быть погруженным в воду в той же степени, что и в двойном поплавке. Тогда из двух найденных величин

$$v = \frac{v_0 + v_h}{2} \text{ и } v_0$$

нетрудно определить v_h

$$v_h = 2v - v_0. \qquad (66)$$

В морском деле при исследовании течений широко применяется двойной поплавок *Митчэля* (рис. 56), состоящий из двух соединенных между собой тонким тросом железных оцинкованных цилиндров (диаметром 20 *см* и высотой 30 *см*). Нижний цилиндр представляет простое ведро, а верхний имеет горлышко, закрываемое пробкой, к которому прикрепляется длинный мягкий трос с марками для определения скорости движения поплавка, выпускаемый с судна.

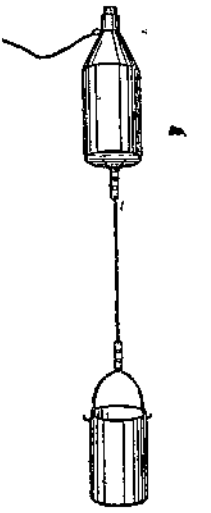


Рис. 56. Поплавок Митчеля.

§ 22. Гидрометрические шесты и поплавки-интеграторы. Применение поплавков в виде шестов, почти достигающих дна, известно с давних пор (см. § 2). Такие поплавки должны давать скорость движения, близкую к средней на вертикали, и движутся всегда с наклоном вперед верхней части, вследствие бо́льших скоростей у поверхности. Шесты изготовляются как деревянные, так и металлические из труб. Нижний конец деревянных шестов загружается камнем или металлом, труб — дробью, песком или водой. Простейшего вида шесты устраиваются из жердей толщиной 3—10 *см*, к которым камни привязываются веревками или подвешиваются в мешке (рис. 57-*a*).

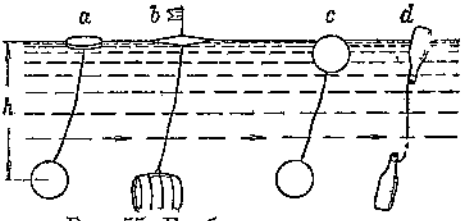


Рис. 55. Глубинные поплавки.

Шесты из свинчивающихся труб очень удобны, так как позволяют по желанию изменять их длину, особенно, когда есть набор звеньев разной величины. При работах на р. Зее (в 1907—1909 гг.) применялись составные шесты длиной до 5 *м* при диаметре труб в 10 *см* и толщине стенок 1 *мм*, и в нижнюю часть шестов насыпалась дробь. В верхней части, для уменьшения наклона шеста, на него можно одевать облегчающие пробковые кольца.

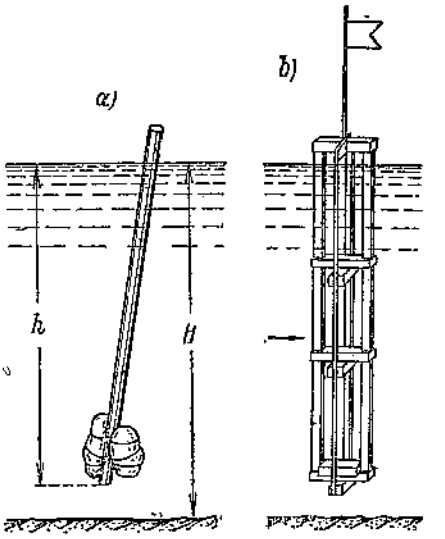


Рис. 57. Гидрометрические шесты.

При работах на р. Эльбе изготовлялись сложные деревянные шесты из 4 брусков, соединенных крестовинами и загруженных кусками железа, длиной до 8 *м* (рис. 57-*b*).

Для получения скорости, близкой к истинной средней по глубине, шесты должны быть по возможности длиннее и в то же время не касаться дна. Отсюда ясно, что целесообразное применение их возможно только на участках с достаточно ровным, правильным руслом. В зависимости от распределения глубин по ширине реки приходится менять длину и загрузку шестов. Если шест задевает за дно, то это легко обнаруживается по внезапному наклону вперед его верхнего конца. При больших скоростях течения шесты не применимы, так как начинают нырять, и точность измерений сильно понижается.

Исследования показывают, что при благоприятных местных условиях измерение скоростей шестами может дать очень хорошие результаты, почти совпадающие с результатами измерения скоростей вертушкой (разница в 3—5%).

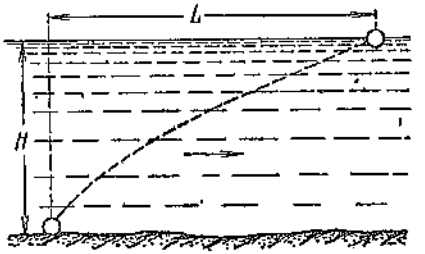


Рис. 58. Всплывание поплавка-интегратора.

Практически можно считать, что скорость движения шеста $v_ш$ равна средней скорости по глубине v_v, если глубина погружения шеста h составляет 0,93—0,95 от полной глубины потока H. Исследования *Френсиса* на каналах в США привели его к выводу, что при значениях h меньше указанных в полученную при измерении шестом величину скорости надо вводить поправочный коэфициент k, меньший единицы:

$$v_v = k \cdot v_ш, \tag{67}$$

причем

$$k = 1 - 0{,}116\left(\sqrt{\frac{H-h}{H}} - 0{,}1\right). \tag{68}$$

Если представить себе тело легче воды погруженным на дно и там удерживаемым, то при освобождении его оно всплывет на поверхность — в стоячей воде вертикально, а в текущей наклонно, со сносом по течению на некоторое расстояние L (рис. 58), которое пропорционально средней скорости течения на вертикали. В самом деле, скорость поднятия такого *поплавка-интегратора* по вертикальному направлению можно считать постоянной: при небольшой разнице удельных весов поплавка и воды подъемная сила поплавка очень быстро уравновесится сопротивлением воды, и он будет равномерно подниматься вверх. Скорость течения перпендикулярна к этому перемещению; поэтому поплавок в каждом слое будет снесен вниз по течению на величину, равную произведению из средней скорости этого слоя v на промежуток времени Δt, нужный для прохождения его поплавком. Таким образом, полный снос L поплавка будет равен:

$$L = \Sigma\,(v \cdot \Delta t) = \Delta t\,\Sigma v.$$

Если число слоев есть n, а время полного поднятия поплавка T, то

$$n \cdot \Delta t = T \text{ и } v_v = \frac{\Sigma}{n};$$

поэтому

$$L = \frac{T}{n} n \cdot v_v = T \cdot v_v$$

и

$$v_v = \frac{L}{T}. \tag{69}$$

Если поплавок всплывает в стоячей воде с постоянной скоростью $a = \frac{H}{T}$, которую легко определить заранее, то

$$v_v = \frac{a}{H} L = cL, \tag{70}$$

где c при данной глубине H и для данного поплавка — величина постоянная, которая легко может быть определена для разных глубин. Тогда для вычисления средней скорости на вертикали v_v нужно будет определять только глубину H и величину сноса поплавка L, не прибегая к измерению времени T.

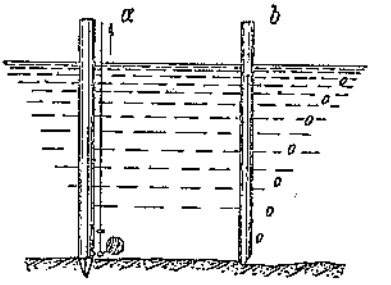


Рис. 59. Поплавки-интеграторы.

Всплывающий поплавок можно осуществить, например, в виде деревянного шара, прикрепленного ниткой к веревке, пропущенной через колечко внизу деревянного шеста (рис. 59-*a*). Если дернуть за веревку, нитка обрывается и поплавок всплывает. Его следует загрузить прибиванием железа или свинца так, чтобы он был лишь немного легче воды и всплывал медленно, тогда точность измерения скорости будет больше. Для измерения длины сноса L к шесту прикрепляется лента или линейка, располагающаяся на поверхности воды по течению. Вместо деревянного шара в качестве поплавка-интегратора можно применять подкрашенное масло, которое вдувается по трубке, опущенной до дна, или воздух, поступающий из баллона под давлением по трубке с краном и выходящий на поверхность в виде пузырьков (рис. 59-*b*).

Можно также устроить поплавок-интегратор, который сперва тонет, а затем всплывает. К деревянному шару на стержне приделывается круглая полочка (рис. 60), которая загружается камнями. При опускании в воду поплавок тонет ниже по течению, коснувшись дна наклоняется, освобождается от груза и всплывает еще дальше. И в этом случае, как легко сообразить, средняя скорость по глубине равна

$$v_v = \frac{L}{T},$$

где L есть величина полного сноса от точки погружения поплавка в воду до точки его выныривания, а T — соответствующий промежуток времени.

Действительно (рис. 61),

$$L = l_1 + l_2 = v_v \left(\frac{H}{a_1} + \frac{H}{a_2} \right),$$

так как снос при погружении $l_1 = \frac{v_v H}{a_1}$, а при всплывании $l_2 = \frac{v_v H}{a_2}$; но

$\frac{H}{a_1} = t_1$ (время погружения), $\frac{H}{a_2} = t_2$ (время всплывания), $t_1 + t_2 = T$; по этому

$$L = v_0 (t_1 + t_2) = v_0 T,$$

чем и подтверждается основное соотношение (69).

Для надежности результатов и исключения случайностей, могущих иметь место при освобождении поплавка от груза, пускание поплавка в каждой точке производится не менее трех раз.

Аналогично погружающемуся и всплывающему поплавку, можно приближенно измерять среднюю поверхностную скорость реки по сносу лодки, переезжающей от берега к берегу и обратно с равномерной скоростью движения в направлении, перпендикулярном к берегам (на прямолинейном участке с параллельными бере-

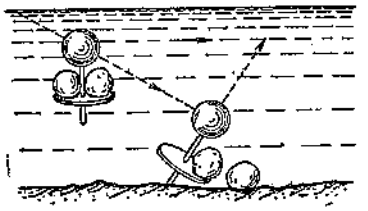


Рис. 60. Поплавок-интегратор.

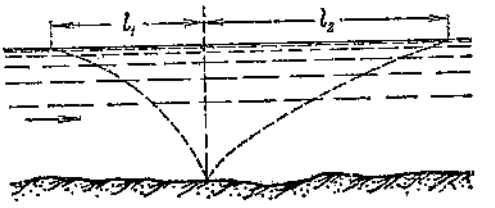


Рис. 61. Траектория поплавка-интегратора.

гами). И в этом случае средняя поверхностная скорость течения (если лодка сидит неглубоко в воде) получится как частное от деления полной величины сноса лодки на время переезда.

§ 23. Измерение скоростей поплавками. Измерение скоростей течения при помощи поплавков, которое, как уже отмечалось, может производиться не только для определения расхода воды, но и для других целей, находит применение, главным образом, в следующих случаях:

1) при невозможности применять другие или более точные приборы (вертушки), вследствие их непригодности в данных условиях: при ледоходе, большом содержании в воде наносов, травы и т. п., трудности их установки из-за больших скоростей течения, при слишком малых скоростях, которые не улавливаются вертушками, или вследствие отсутствия других приборов и недостатка средств;

2) когда требуется выяснить детальную картину распределения поверхностных скоростей в плане.

Что касается весьма малых скоростей, то в этом случае поплавочные измерения могут давать даже более точные результаты, чем вертушки.

Кроме того, как уже указывалось, весьма важным условием применимости поверхностных поплавков является отсутствие ветра, имеющее сугубое значение при измерении малых скоростей. Ветреная погода иногда подолгу заставляет терять время в ожидании момента, когда можно приступить к производству измерений, и искажает их настолько, что они могут потерять всякую ценность.

Можно отметить также, что при подъеме уровня в реке поверхностные поплавки на прямолинейном участке имеют стремление приставать к берегам, а при спаде воды — наоборот, собираться у оси потока. С этой точки зрения желательно производить измерения,

если это обстоятельство имеет значение, во время установившегося стояния уровня воды.

Так как основным элементом, подлежащим измерению для определения скорости, наряду со временем является длина пути поплавка, то главнейшие работы и заключаются в том, чтобы сделать возможным ее определение. Это достигается путем разбивки *створов*, которые должны быть перпендикулярны к общему направлению течения, если скорости определяются для получения в конечном итоге величины расхода реки (подробнее о разбивке створов для этого случая см. в гл. III). Створов устанавливается несколько параллельно друг другу и на таком расстоянии одни от другого, чтобы скорости могли быть измерены достаточно точно (обычно расстояние L между ство-

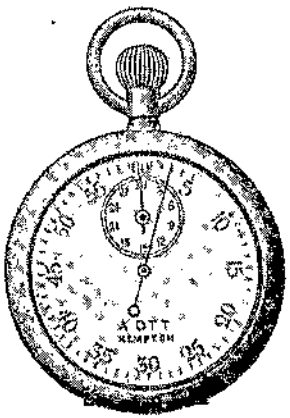


Рис. 62. Обыкновенный секундомер.

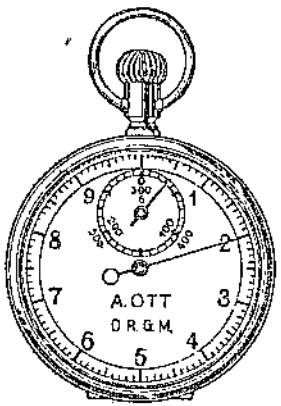


Рис. 63. Точный секундомер Отта.

рами берется равным от 25 до 40 v_0.) Выше верхнего створа (в 5—20 $м$) назначается дополнительный «*пусковой*» створ, в котором пускаются поплавки. Число точек на пусковом створе зависит от цели измерений, в каждой точке для контроля пускается по несколько поплавков. Моменты прохождения поплавков через створы, в которых расставляются сигнальщики, следящие за поплавками, фиксируются по секундной стрелке карманных часов или более точно — по *секундомеру*.

Точки, в которых поплавки пересекают створы в плане, могут отмечаться разными способами: по перетянутой по створу размеченной бечеве или тросу, засечками при помощи угломерных инструментов (кипрегеля с мензулой или теодолита) или засечками при помощи косых створов и передвижных вех (см. § 46). Большую услугу в этом отношении может оказать фотографирование поплавков с высокого берега (если таковой имеется) через определенные промежутки времени, имеющее еще то преимущество, что таким образом можно наблюдать одновременно движение целого ряда поплавков.

Наиболее распространенный тип секундомера (рис. 62) представляют карманные часы с большой секундной стрелкой, которая обхо-

дит полный круг в 1 минуту. Циферблат имеет деления через $^1/_5$ секунды, полные минуты отсчитываются по маленькому кругу, разделенному на 30 минут. При нажиме на головку для завода секундомера секундная стрелка приходит в движение, при втором нажатии она останавливается, а при третьем возвращается на нуль. Точность отсчета 0,1 секунды. Очень удобны секундомеры с двумя секундными стрелками. При первом нажиме обе стрелки двигаются вместе, показывая одинаково, при втором нажиме останавливается одна стрелка, а другая идет дальше, при третьем первая стрелка скачком догоняет вторую и т. д. Таким образом промежуточный отсчет может быть сделан очень точно по неподвижной стрелке. Более точные секундомеры (рис. 63) имеют циферблат, разделенный на 10 секунд с делениями через 0,1 секунды, позволяющими оценить на-глаз тридцатые доли секунды. На маленьком циферблате отсчитываются десятки секунд до 600 секунд.

Определив длину пути поплавков (или шестов) между створами, точки пересечения створов поплавками и время их прохода, можно вычислить скорости и нанести траектории поплавков на план исследуемого участка.

Ход работ по измерению скоростей поплавками-интеграторами ясен из описания самих приборов. Шест или трубка поплавка-интегратора устанавливается с лодки, временного мостика или вброд. Первый пуск поплавка делается пробным, чтобы иметь возможность при дальнейшем более точно определять величину сноса, которая берется средней из нескольких надежных отсчетов.

§ 24. Профильные поплавки. Если применение гидрометрических шестов по сравнению с поверхностными и глубинными поплавками уже ограничено условием продольного однообразия глубин, то для непосредственного измерения поплавками средней скорости во всем живом сечении требуется еще большее однообразие движения, а именно строгое постоянство поперечного сечения потока. Поэтому применяемые с этой целью методы пригодны лишь для правильных каналов и трубопроводов постоянного сечения и используются главным образом на гидроэлектрических установках.

Ширма (экран) *Андерсона*, предложенная им в 1906 г., представляет легкий вертикальный щит, перегораживающий все живое сечение канала и подвешенный к тележке, движущейся по рельсам. Для того, чтобы экран двигался со скоростью, равной средней скорости потока, необходимо уменьшение до минимума щелей между ним и дном и стенками канала, а также сопротивления тележки.

Потребная длина канала определяется из условий скорости течения и точности измерения времени пробега ширмы на заданном расстоянии (10—20 *м*). Применение электрической регистрации времени и пути позволяет определять среднюю скорость течения с высокой точностью до 0,5—1,0%, а по ней — и расход воды.

Установки, оборудованные такого рода приспособлениями, существуют в Швеции и Германии.

Метод *«солевого экрана»* или *солескоростной* метод *Аллена* первоначально (1923 г.) был предложен для трубопроводов, но потом распространен и на каналы. Ныне он широко используется в США.

Сущность этого метода заключается в том, что в некотором пункте в поток впрыскивается под давлением порция крепкого раствора соли (обычно поваренной), который уносится течением. Образующееся в воде облако раствора можно рассматривать как бесконечно большое число мельчайших поплавков. Прохождение раствора через определенные сечения потока наблюдается при помощи установленных в них *электродов* (тонких серебряных, медных или стальных пластин), пользуясь тем обстоятельством, что присутствие в воде соли увеличивает ее электропроводность.

Через электроды пропускается ток, сила которого регистрируется на ленте самопишущего амперметра параллельно с записью времени. Солевой раствор, проходя мимо электродов в сечении 1, вызывает повышение силы тока в виде волны A (рис. 64), а проходя через

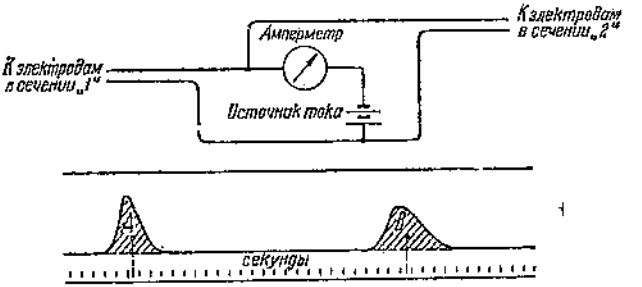


Рис. 64. Схема соединений и изменение силы тока при прохождении солевого облака.

сечение 2 — волну B. Отсюда получается время прохождения раствора между сечениями 1—2, расстояние между которыми известно, и скорость прохождения раствора, равная средней скорости потока.

На ленте вторая волна повышения силы тока обычно длиннее и ниже, чем первая, вследствие смешения раствора с водой в пути; точное определение искомого промежутка времени при этом получается по положению центров тяжести площадей A и B.

Во избежание чувствительных ошибок при измерении времени, рекомендуется, чтобы оно было не менее 20 секунд. Кроме того, наилучшие результаты получаются, если электроды отражают прохождение раствора во всем сечении, а впрыскивание производится не в одной точке сечения, а в нескольких.

Испытание солескоростного метода в Германии на бетонном канале (1930 г.) при средних скоростях течения от 0,3 до 1,2 *м/сек.* показали весьма высокую точность этого метода (см. § 55).

§ 25. Вертушки на горизонтальной оси, их основные части и типы. Изобретателем гидрометрической вертушки принято считать гамбургского гидротехника *Вольтмана*, который около 1790 г. впервые применил подобный прибор для измерения скорости течения воды.

Вертушка *Вольтмана* (рис. 65) имела 4 прикрепленных спицами к горизонтальной оси пластинки, наклоненных к плоскости вращения наподобие крыльев ветряной мельницы и приводимых в движение течением. На оси вращения крыльев, установленных навстречу те-

чению, устроен бесконечный винт, передвигающий зубчатое колесико, ось которого сидит на рычаге, соединенном шарниром с общей рамкой, надетой на вертикальную штангу. При помощи пружинки рычаг отжимается вниз, разобщая колесико и бесконечный винт. Включение колесика производится поднятием рычага за шнур, выпущенный над поверхностью воды и там прикрепляемый к штанге, выключение — ослаблением шнура. На окружности колесика нанесены деления, каждый зубец соответствует одному полному обороту крыльев вертушки. Рамка передвигается по штанге и может быть закреплена в любом положении зажимными винтами.

Первоначально штанга с вертушкой прочно устанавливалась на дне потока, потом вертушку стали погружать на нужную глубину, укрепляя штангу над поверхностью воды *(подвесная штанга)* или же

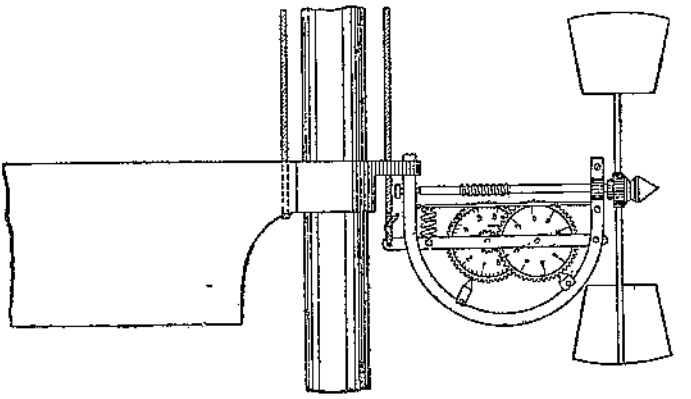


Рис. 65. Вертушка Вольтмана.

упирая ее в дно и заставляя по ней передвигаться вертушку при помощи подъемного шнура. При этом для того, чтобы вертушка устанавливалась навстречу течению, появилась необходимость снабжать ее рулем или хвостом, а для отсчета большого числа оборотов — вторым зубчатым колесиком, соединенным с первым и вращающимся в десять раз медленнее.

С течением времени конструкция вертушки подверглась разнообразным видоизменениям и усовершенствованиям, приведшим к существованию ныне целого ряда типов. Тем не менее в каждой вертушке можно различать три основных части:

1) *лопасти* или крылья с осью, на которой они вращаются,

2) *тело* вертушки со счетным механизмом и

3) *руль* или хвост, заставляющий вертушку надлежащим образом устанавливаться в потоке.

Лопасти могут иметь весьма разнообразную форму, начиная с пластинок, укрепленных на спицах, до криволинейных поверхностей, непосредственно примыкающих к оси, а также промежуточные формы. Пластинки трапецоидального очертания в числе двух, трех или четырех только в первоначальных конструкциях делались плоскими, теперь же им почти всегда придается криволинейная поверхность.

Баумгартен впервые ввел в употребление винтовые *(геликоидальные)* лопасти, а *Гайош* предложил лопасти, очерченные по параболе двойной кривизны. Эти усовершенствования позволили значительно повысить чувствительность вертушек в смысле измерения малых скоростей течения.

Наклон лопастей вертушки к оси характеризуется их *шагом* так же, как и для обыкновенного винта. Если бы вертушка работала в идеальной жидкости при отсутствии всякого трения (о воду и в подшипниках), то шаг ее лопастей k определялся бы из условия:

$$v = kn, \tag{71}$$

где n — число оборотов лопастей в 1 секунду;
отсюда

$$n = \frac{v}{k}, \tag{72}$$

т. е. при данной скорости течения лопасти должны вращаться тем быстрее, чем меньше их шаг. Трение замедляет вращение лопастей, а при малых скоростях лопасти большого шага могут совсем не вращаться, почему в этом случае приходится употреблять лопасти с малым шагом. При больших скоростях, наоборот, лопасти малого шага будут слишком быстро вращаться, что может оказаться неудобным для отсчета числа оборотов. В виду этого некоторые вертушки снабжаются набором съемных лопастей разного шага.

Диаметр лопастей колеблется в разных конструкциях вертушек в широких пределах — от 3 до 20 *см*. Лопасти большого диаметра являются, вообще говоря, более чувствительными; однако они вращаются под влиянием скоростей всего захватываемого их высотой слоя воды, не позволяя приблизиться к измерению скорости течения в данной точке потока и являясь неудобными при малых глубинах. Кроме того, от диаметра лопастей зависит возможность измерять скорости, близкие к поверхности и к дну (крылья должны быть целиком погружены в воду и не должны задевать за дно).

Тело вертушки, в котором помещается счетный механизм, так же, как и лопасти, устраивается разнообразной формы и конструкции, которые будут рассмотрены ниже при описании наиболее употребительных типов вертушек. Весьма важно, чтобы тело вертушки было *удобообтекаемым*, т. е. по возможности меньше нарушало естественное движение воды. В этом отношении желательно, чтобы оно имело минимальные поперечные размеры и плавные очертания.

Хвост вертушки также имеет различные устройства. Когда вертушка скользит по штанге, свободно вращаясь вокруг оси последней (этот способ теперь не применяется), хвост служит рулем, устанавливающим ось вертушки в направлении скорости течения. Если вертушка опускается на тросе, то назначение хвоста, кроме того, — поддерживать ось вращения вертушки в горизонтальной плоскости. При этом, как и все вертушки на тросе, она измеряет наибольшую скорость течения, а не проекцию ее на направление оси вращения, как это имеет место в вертушках, закрепляемых на штанге или передвигающихся по ней в определенной вертикальной плоскости.

К конструкции хвоста применимы те же требования в смысле

удобообтекаемости, что и к телу вертушки. В некоторых конструкциях штанговых вертушек хвост совсем отсутствует.

То простое устройство для отсчета числа оборотов крыльев вертушки, которое применил *Вольтман (механический счетчик)*, имеет два крупных недостатка: оно требует вынимания вертушки из воды каждый раз для производства отсчета и не дает возможности следить за работой вертушки в воде (за пульсацией, попаданием на крылья травы, остановками). Поэтому оно может считаться уже устаревшим. Более удобными приспособлениями, позволяющими отсчитывать число оборотов и наблюдать за работой вертушки, не вынимая ее из воды, являются *слуховая передача* при помощи телефона (акустический счетчик), соединенного трубкой с вертушкой и дающего возможность отсчитывать удары, слышимые через определенное число оборотов лопастей, и *электрическая сигнализация*, замыкающая ток через то же число оборотов лопастей. В последнем случае замыкание тока приводит в действие электрический звонок, гудок (зуммер), счетчик оборотов или перо самопишущего прибора.

Электрическая сигнализация является наиболее совершенным и современным устройством, применяемым во всех вертушках новых систем. Контакт через определенное число оборотов лопастей (1, 5, 10, 20, 25, 40, 50 или 100) может происходить:

а) в текучей воде,

б) в камере, наполненной водой или другой жидкостью (например, маслом),

в) в воздушной камере,

и осуществляться при помощи:

а) периодического соприкосновения штифтика, укрепленного на зубчатом колесике червячной передачи, или эксцентрика на оси вертушки (или на оси зубчатого колесика) с пружинящим рычажком,

б) постоянно трущихся друг о друга частей, например вращающегося диска из непроводника с металлической вставкой и прилегающего к нему такого же неподвижного диска или (вместо него) касающегося его металлического штифта,

в) капли ртути, перекатывающейся во вращающемся барабанчике из непроводника.

Помещение контактного устройства в камеру с маслом или наполненную воздухом имеет целью обеспечить его правильную работу — избежать засорения и окисления контактов. Замена периодического соприкосновения частей с пружинящим рычажком постоянно трущимися частями преследует сохранение неизменности сопротивлений при вращении крыльев, употребление же ртути — сведение до минимума добавочного трения в момент замыкания тока.

Стремление уменьшить трение в вертушке приводит к устройству осей, вращающихся на остриях, а также на шариковых и роликовых подшипниках, а стремление сделать трение неизменным — к употреблению стали, твердого никеля, агата и других материалов, обладающих высокой твердостью.

Некоторые типы вертушек снабжаются так называемым *донным контактом*, дающим электрический сигнал в момент достижения прибором (или подвешенным под ним грузом) дна.

В результате всех этих усовершенствований можно считать вертушку точным прибором для измерения скоростей, позволяющим определять последние с ошибкой в 1—3% (при благоприятных условиях). Надо иметь в виду, что точность результатов измерений зависит не только от совершенства прибора, но в не меньшей мере и от условий его применения и характера потока. Так, например, с уменьшением величин измеряемых скоростей ниже известного предела точность измерений быстро падает.

Вертушки на штанге в этом отношении имеют очевидные преимущества перед вертушками на тросе — в смысле точности и неизменности установки их в определенной точке.

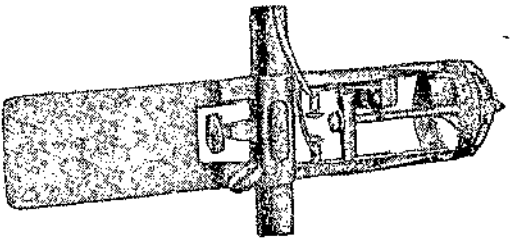


Рис. 66. Вертушка Отта X.

Однако пределы применимости штанги ограничиваются глубинами и скоростями течения. Обычно маневрирование со штангой становится затруднительным, вследствие ее большого веса, изгиба напором воды и вибрации, при глубинах больше 6—8 *м* и скоростях свыше 2 *м/сек.*, хотя можно указать, например, случаи применения на Рейне штанги длиной до 18 *м*.

Ниже мы рассмотрим лишь наиболее употребительные и современные конструкции вертушек с горизонтальной, а затем и с вертикальной осью.

§ 26. Вертушки Отта. К особенно распространенным конструкциям принадлежат вертушки баварской фирмы *Отта* (в Кемптене), широко употребляемые в Европе, в СССР и за океаном (в Северной и Южной Америке). В Россию они стали проникать с начала текущего столетия, а ныне некоторые типы их (IV, V, X) изготовляются и у нас в Союзе. Поэтому остановимся на этих вертушках более подробно.

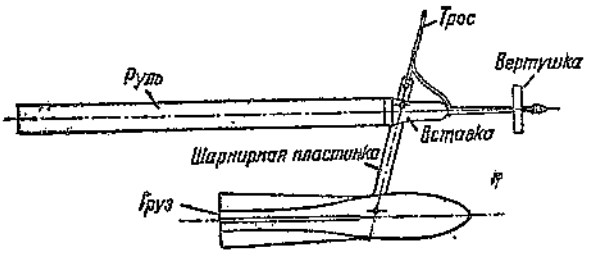


Рис. 67. Подвешивание вертушки на тросе.

Вертушки *Отта* чрезвычайно разнообразны, начиная с простейшего типа с механическим счетчиком, сходного с вертушкой *Вольтмана* (карманная вертушка типа I), кончая вертушками *магнитными* (типа VI и VII), *масляными* (тип V), с указателем направления течения (тип VIh, VIIh) и специального назначения (вертушки для трубопроводов, лаги, измерители хода судов).

Вертушки типа IV, IX-a и X снабжены открытым контактным устройством. Из них типы IX-a и X (рис. 66) подобны между собой в основном, отличаясь размерами. Их трехкрылые лопасти окружены неподвижным защитным цилиндрическим ободком, прикрепленным

к рамке, составляющей тело вертушки. Ось вращается на остриях, упирающихся в сапфировые подпятники. Диаметр лопастей в типе X всего 5,5 *см*, контакт через 500 оборотов; в типе IX — диаметр 9 *см*, и контакт может быть установлен на 25, 50 или 100 оборотов. Детали устройства видны на рисунке.

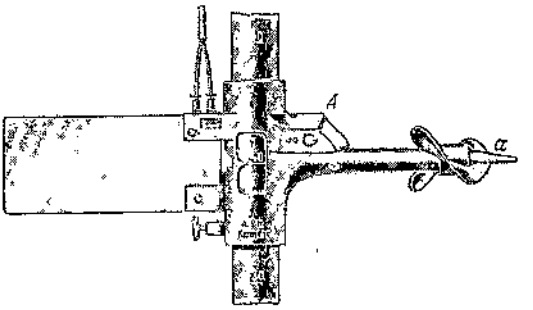


Рис. 68. Вертушка Отта IV.

Вертушка типа X,[1] наименьшая из вертушек *Отта*, помещается в ящике размерами всего 22,5 × 11 × × 11,5 *см* и весом 1,5 *кг* и очень удобна при разъездах.

Круглые штанги к ней имеют диаметр 2 *см* и длину до 3—4 *м*. К этой же вертушке можно пристроить приспособление для опускания ее на тросе (рис. 67), состоящее из вставки, длинного пустотелого руля прямоугольного поперечного очертания, шарнирной пластинки, рыбовидного груза и кабеля, служащего одновременно тросом, с защелкивающимся крючком, зацепляемым за верхнее отверстие пластинки.

Вертушка IV типа изображена на рис. 68; ее лопасти съемные (разного шага), диаметром 12 *см*, закрепляются на оси винтовым наконечником. Ось вращается в шариковом подшипнике и задним концом упирается в агатовый подпятник.

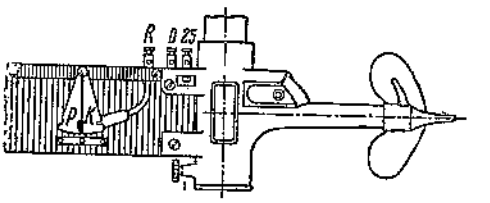


Рис. 69. Маятник Эппера.

Контактное устройство, такое же, как и в вертушке X типа, помещается в камере *A*, закрываемой задвижкой и легко доступной для очистки контактов. Зажимные винты для проводов (сигнализация через 25 оборотов) поставлены около руля, весь корпус отливается из одного куска металла и имеет плоскую и удообтекаемую форму. Вертушки этого типа изготовляются для штанг круглого (27 *мм*) и овального (40 × 20 *мм*) сечения и могут иметь подвесной крюк для перемещения при помощи троса вдоль штанги.[2]

Для регистрации обратных течений к вертушке может присоединяться руль с *маятником Эпера P* (рис. 69), касающимся контакта *K* при перемене направления течения на противоположное. В качестве сигнального прибора служит гудок или оптический указатель, в окошечке которого при обратном течении появляется красный диск вместо черного при нормальном течении.

---

[1] Вертушки этого типа изготовляются заводами ГУГМС в Тбилиси и Ленинграде.

[2] Вертушки этого типа в 1930—1932 гг. изготовлялись производственным отделом Гос. Гидрологического института в Ленинграде. Близкие по конструкции вертушки выпускались Лабораторией гидравлических установок (ЛАГУ) при Московском институте инженеров водного хозяйства и мелиорации в 1930—1934 гг.

Вертушка типа V имеет контактное устройство в камере, наполненной жидким минеральным маслом, и рекомендуется фирмой *Отта* в качестве универсального прибора, годного при всех величинах скоростей, любых глубинах, для чистой и грязной воды, для штанги и троса, открытых русел и труб. Ее общий вид показан на рис. 70, а подробности — на рис. 71. Она состоит из образующей одно целое вращающейся части *Aa* с лопастями, подшипниками и осью и отдельной камеры *B* с контактным устройством, которые при работе соединяются вместе.

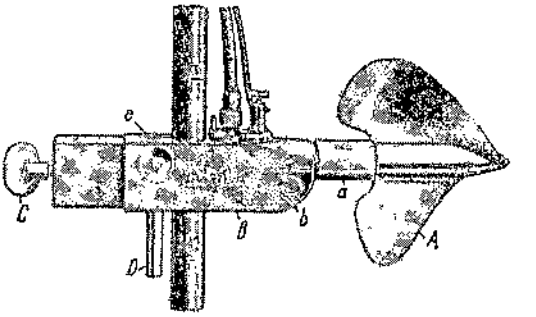


Рис. 70. Вертушка Отта V.

Лопасти состоят из двух крыльев, сделанных из цельного куска легкого металла, и имеют диаметр нормально 12 *см* и меньше (до 6 *см*). Корпус вертушки выкован из одного куска латуни и имеет поперечные размеры 25 × 42 *мм*. Выступающий снизу стержень *D* защищает крылья от удара о дно, такой же стержень может быть привинчен сверху (если вертушка применяется для измерения скоростей в трубе). Контактное приспособление помещается в двух ка-

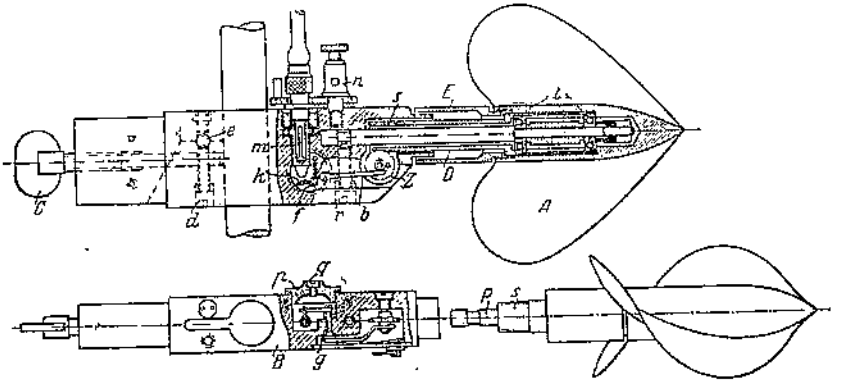


Рис. 71. Разрез вертушки Отта V.

мерах — обычной, закрываемой задвижкой *b*, и водонепроницаемой, заполненной маслом и завинчиваемой крышкой *p* (сзади). В первой камере находится зубчатое колесико Z, приводимое в движение винтовой нарезкой на трубке *s*, которая вращается на шариковых подшипниках вместе с крыльями вокруг неподвижной оси, зажатой в теле вертушки винтом *r*. Колесико так же, как и в предыдущих конструкциях, имеет вблизи своей оси штифтик, отжимающий книзу рычажок через 20 оборотов (или через 10 оборотов при двух штифтиках).

Рычажок противоположным концом насажен наглухо на горизонтальную ось *g*, вращающуюся в канальце, соединяющем обе камеры.

На другом конце оси, в камере с маслом, к ней наглухо приделан другой рычажок *f*, отжимаемый пружинкой вниз и поднимающийся при опускании первого рычажка. При подъеме он прикасается концом *k* к полукруглому выступу, соединенному со штепсельным гнездом *m*, изолированным от тела вертушки муфтой из жесткой резины. В это гнездо вставляется штепсель с одним концом провода, другой провод присоединяется к зажиму *n*, соединяющему его с телом вертушки. Таким образом, при этом устройстве контакт имеет место не в точке прикосновения рычажка к штифтику зубчатого колеса, как в других конструкциях, а в наполненной маслом камере, куда вода не имеет доступа. Благодаря этому нет окисления контактных поверхностей, которое всегда происходит в воде; кроме того, вода, содержащая кислоты или известь, сама является проводником и нередко создает замыкание тока даже при разобщенных металлических полюсах, что очень затрудняет работу обыкновенными вертушками. Камера наполняется маслом при отвинчивании крышки *p*, а чтобы в ней не осталось воздуха, вынимается винтик *q*, завинчиваемый на место после закрепления крышки.

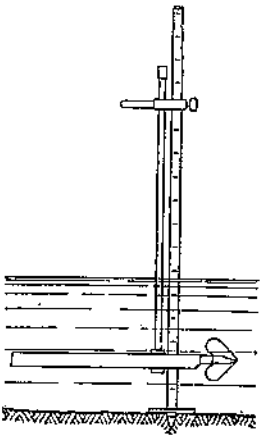


Рис. 72. Вспомогательная штанга.

Налитое в камеру масло сохраняется очень долго (6 месяцев и больше). Маслом наполняется также пространство во втулке между лопастями вертушки, где помещаются точные шариковые подшипники из закаленной стали *t*, и зазор вокруг оси, где оно долгое время удерживается вследствие капиллярности в длинной и узкой цилиндрической щели. Доступ воды к оси затруднен еще внешней обоймой *E*.[1]

Для возможности обнаружить обратное течение, взамен обычного вставляется особое зубчатое колесико *Z*, благодаря которому получаются два сигнала: при нормальном направлении течения — сначала короткий, а затем более длинный (звонок или гудок), при обратном — сначала длинный, а потом короткий.

Штанга, по которой передвигается вертушка, имеет диаметр в 2 *см*. На ней вертушка может закрепляться винтом *C* или перемещаться особой вспомогательной штангой (рис. 72), причем на задний конец вертушки может надеваться длинный пустотелый руль.

При опускании вертушки с троса применяются приспособления, указанные выше (рис. 67).

Фирма *Отта* указывает на следующие преимущества этой вертушки:

1) чувствительность, позволяющая измерять скорости, начиная с 3 *см/сек.* (и до 6 *м/сек.*),

2) малый размер, не вызывающий подпора даже в небольших речках;

[1] Вертушки типа V изготовляются в Ленинграде заводом «Гидрометприбор» ГУГМС.

3) надежная работа вертушки в грязной и с химическими примесями воде,

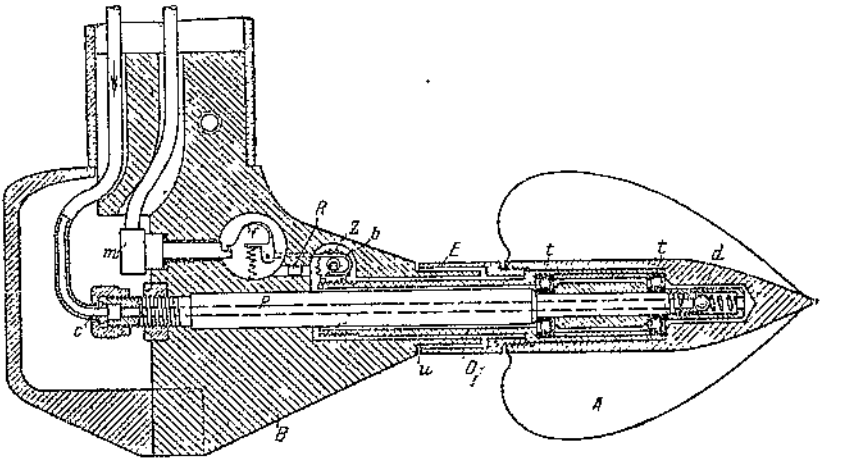


Рис. 73. Вертушка Отта для трубопроводов.

4) компактность устройств и малый вес,
5) возможность обнаружения обратных течений.

Вертушки масляного типа, работающие в *напорных трубопрово-*

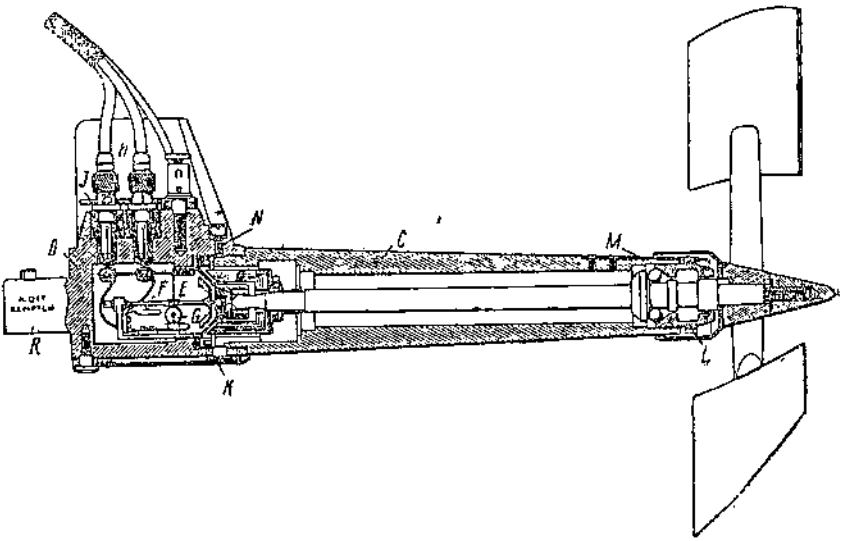


Рис. 74. Разрез магнитной вертушки Отта.

дах, снабжаются приспособлениями для подвода масла, которое нагнетается в них при помощи насоса. На рис. 73 для этой цели служит медная трубка, присоединенная к точке *c* к заднему концу насквозь просверленной неподвижной оси вертушки *P*. Масло посту-

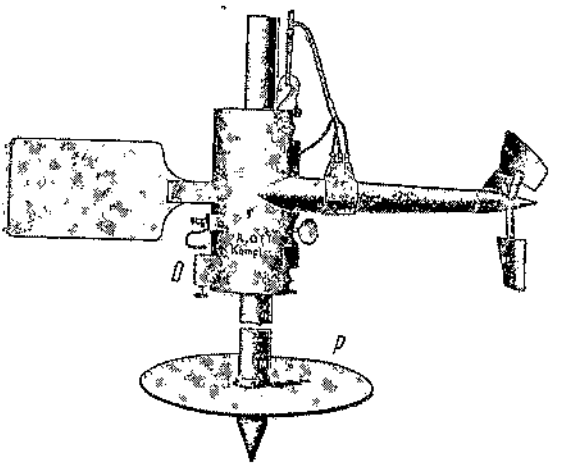


Рис. 75. Магнитная вертушка с поддоном.

пает в камеру с подшипниками t через пружинный вентиль d, а оттуда — через зазор между осью и втулкой D в камеру с контактным колесиком Z и через щель tt в воду.

Так как такие вертушки работают иногда под очень высоким напором (свыше 400 *м*), то наполненная маслом контактная камера f снабжается уравнителем давления, представляющим собой маленький поршень R. Вторая трубка, присоединенная к вертушке в точке m, содержит электрический провод.

Так называемые *магнитные вертушки Отта* изготовляются с камерой двух размеров — меньшего (тип VI) и большего (тип VII). Конструкция этой камеры показана на рис. 74.

Контактный механизм заключен в прочной, герметически закрытой толстостенной коробке B и приводится в действие извне путем магнитной индукции. На передней конической стенке коробки B помещается агатовый подпятник, в котором вращается задний конец оси вертушки. На оси закреплен колоколообразный с толстыми стенками магнит D, нижняя коническая поверхность которого почти вплотную подходит к такой же стенке герметической коробки. Внутри последней на самостоятельной оси, составляющей как бы продолжение оси вертушки, против магнита насажен крестовидный якорь E, точно воспроизводящий, благодаря индукции, вращение магнита. На оси якоря имеется червячная передача к колесику G с обычного устройства контактом через 25 оборотов и эксцентрик F, дающий замыкание тока через каждый

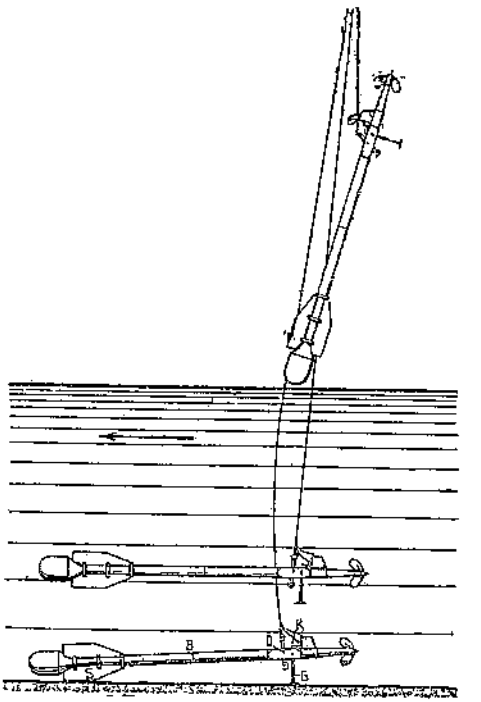


Рис. 76. Магнитная вертушка на тросе.

оборот. Снаружи им соответствуют два штепсельных изолированных от тела вертушки гнезда *I* и *H*, рядом с которыми расположен зажим *O*, соединяющий провод с телом вертушки.

Камера *C* для оси вертушки имеет слегка коническую форму и плотно привинчивается к контактной камере *B*. Передний конец ее закрывается винтовой муфтой *L*, образующей подшипник, в котором помещаются 8 шариков. Единственные отверстия в камере *C* — клапан *K*, плотно закрываемый плоской пружиной, и кольцевая щель между осью и муфтой подшипника.

Перед употреблением вертушки камеру *C* наполняют чистой водой или керосином, после чего во время работы в нее не может проникнуть ни речная вода, ни вредный для подшипников песок.

Лопасти изготовляются съемные — трехкрылые спицевые и скошенные (как у IV и V типа), диаметром в 17 *см* (для VI типа) и 25 *см* (для VII типа), закрепляемые на оси коническим винтовым наконечником. При помощи штыкового затвора *R* все устройство присоединяется к корпусу, надеваемому на штангу, или подвесному приспособлению разных типов. Штанги употребляются круглого (диаметром 32, 45, 60, 75 *мм*) и овального (54 × 27 и 75 × 35 *мм*) поперечного сечения. На рис. 75 изображена вертушка типа VII-a с донным контактом *D*, надетая на штангу с поддоном *P*, а на рис. 76 — вертушка типа VI-d на тросе. Последняя имеет тяжелую серединную вставку *BD* (почему груз при небольшой глубине и малой скорости может оказаться ненужным) и легкий, пустой внутри хвост с плавниками *S*, которые могут передвигаться вдоль трубы для точного уравновешивания всего прибора (его вес около 14 *кг*); *G* представляет донный контакт. При больших глубинах и скоростях к вертушке подвешиваются грузы различной формы (рыбовидные, в виде линзы или шара) весом от 25 до 110 *кг*.

Для измерения скоростей течения в поверхностном слое, когда по водоему плывет много сору, сплавляется лес россыпью и т. п., может применяться *вертушка на буксире* типа VI-f (рис. 77), подвешенная к цилиндрическому поплавку с приподнятым носом; поплавок на длинном тросе удерживается в нужных точках створа и для лучшей видимости снабжается флагом.

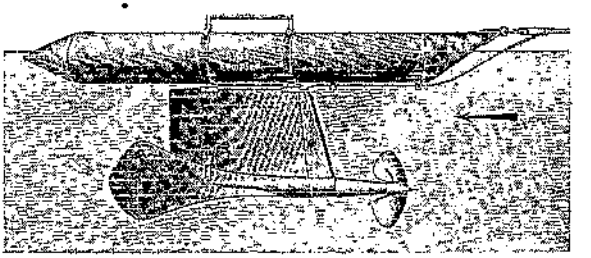


Рис. 77. Вертушка на буксире.

В подобных же случаях может употребляться *электрический лаг*, сконструированный по тому же принципу и служащий обычно для измерения скорости хода судна (рис. 78).

Кроме перечисленных типов вертушек, фирма *Отта* изготовляет еще разнообразные их видоизменения, а также вертушки, регистрирующие направление течения, описываемые ниже (§ 29).

Одним из последних новшеств фирмы *Отта* является недавно выпущенная *динамовертушка*, позволяющая определять непрерывно мгновенные скорости течения. Принцип ее устройства заключается в том, что осью вращения крыльев в задней части корпуса вертушки приводится в действие миниатюрный генератор

постоянного тока мощностью около 0,3 ватта. Шкала электроизмерительного прибора градуирована так, что по ней можно непосредственно прочитать скорости течения.

Интересно отметить, что этот прибор мог бы быть несколько видоизменен и превращен в точный прибор для измерения малых скоростей согласно идее *Уэда*,

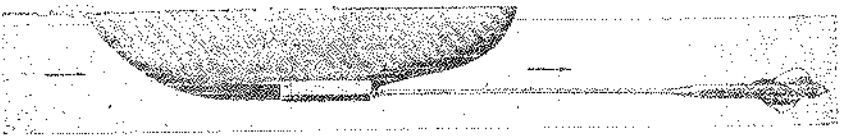


Рис. 78. Электрический лаг.

который предложил вертушке, опускаемой в воду, давать некоторую постоянную и известную скорость вращения крыльев, достаточную для преодоления начальных сил трения и инерции.

Эта начальная скорость в текучей воде будет изменяться в разной мере, в зависимости от скорости течения, и изменение ее могло бы служить мерой самих скоростей течения. *Уэд* таким образом достиг возможности измерять скорости порядка 0,03 *м/сек.* с точностью до 4%. Для этого потребовалось бы несколько переконструировать вертушку *Отта*, в которой генератор при питании его током может быть обращен в мотор-двигатель.

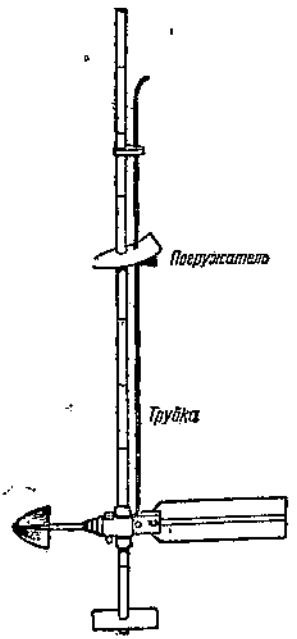


Рис. 79. Вертушка Альбрехта-Килли.

§ 27. Вертушки некоторых других систем.

За границей наряду с вертушками *Отта* изготовляются вертушки системы *Альбрехта* (в Мюнхене). Последняя модель этой фирмы — универсальная вертушка *Альбрехта — Килли* (рис. 79) — характерна тем, что ось ее вращается не на шариковых, а на роликовых подшипниках, чем предотвращается обычное образование желобка в подшипнике от долгой работы шариков. Помимо этого, контакт в закрытой камере осуществляется вращением при помощи червяка одного изолированного диска около второго неподвижного. В дисках устроены металлические круглые гнезда, дающие замыкание тока при их соприкасании. Таким устройством достигнуто равномерное трение, в то время как контактная пружина в вертушках других систем вызывает добавочное сопротивление в момент контакта, которое делается особенно заметным при малых скоростях. Постоянное соприкасание контактных гнезд с поверхностью противолежащего диска предохраняет их также от окисления.

Диаметр лопастей 7 *см*, штанг — 20 и 32 *мм*. При опускании на штанге к задней части вертушки привинчивается трубка длиной около 45 *см*, к верхней части которой прикреплен небольшой щиток — *погружатель*, течением воды прижимающий трубку с вертушкой книзу. Кабель пропущен в трубку и выведен наверх к батарее с гудком. Для удерживания кабеля около штанги имеются направляющие кольца. При небольшом весе вертушки погружатель хорошо удерживает ее на нужной глубине, соответствующей длине натянутого кабеля. Сигналы подаются через 20 или 40 оборотов. При больших глубинах вертушка опускается на тросе с оттяжками, заставляющими ее перемещаться в вертикальном направлении. В этом случае к ней прикрепляются удлиненный хвост, погружатель и донный контакт, вызывающий зажигание цветной лампочки.

В Австрии, Польше, Чехо-Словакии и Венгрии находят применение вертушки венской фирмы *Ганзера*, по существу представляющие весьма простые конструкции с обычной электрической сигнализацией.

На рис. 80 представлен легкий тип вертушки *Ганзера* без хвоста, на штанге, с диаметром крыльев 9 *см* и шариковыми подшипниками. Контактная камера с пружинным устройством может герметически закрываться завинчивающейся круглой крышкой, а от попадания спереди в подшипник грязи и песка вертушка предохранена круглым колпачком. Вертушка передвигается по штанге при помощи цилиндрической муфты, которая закрепляется на ней зажимным винтом.

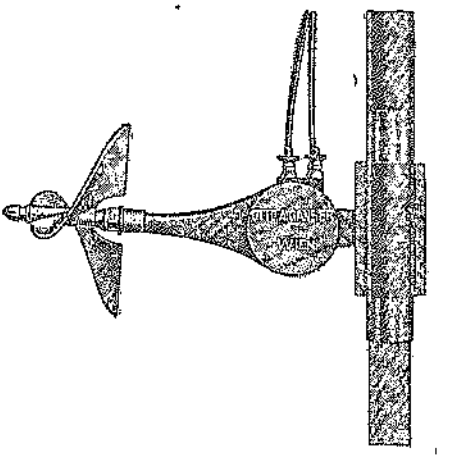


Рис. 80. Легкая вертушка Ганзера.

В нормальном типе вертушки *Ганзера*, несколько большего размера, последняя передвигается по штанге при помощи троса — кабеля, перекинутого через блок, надетый на верх штанги, и проходящего внутри ее. Штанга имеет продольную прорезь (см. рис. 98-*с*).

На рис. 81 изображена торпедовидная вертушка той же фирмы, а на рис. 82 маленькая вертушка для мелких потоков. Диаметр крыльев последней всего 3 *см*, контактное устройство открытое.

Во Франции до мировой войны употреблялись вертушки *Отта*, теперь же они изготовляются французской фирмой *Ришара*, которая выпускает только два типа их — *большой* и малый. Вид первого показан на рис. 83. Вертушка имеет весьма компактную форму с плавными очертаниями, без выступающих частей. Двукрылые лопасти диаметром 12 *см* вращаются на оси, поддерживаемой шариковым подшипником и пятой из твердой стали. Контактная камера, открывающаяся сбоку, имеет обычное пружинное устройство с замыканием тока через 25 оборотов. Хвост овальной формы. Сверху вертушка имеет отверстие, куда помещены зажимные винты для проводов. В нем укрепляется или конец штанги или специальный вкладыш для троса. Провода идут внутри штанги, и вертикальное перемещение вертушки может осуществляться только подъемом и опусканием самой штанги, для которой устраиваются особые держатели.

Малая модель имеет крылья диаметром 8 *см*, защищенные цилиндрическим ободком, как в вертушках *Отта* тип IX и X.

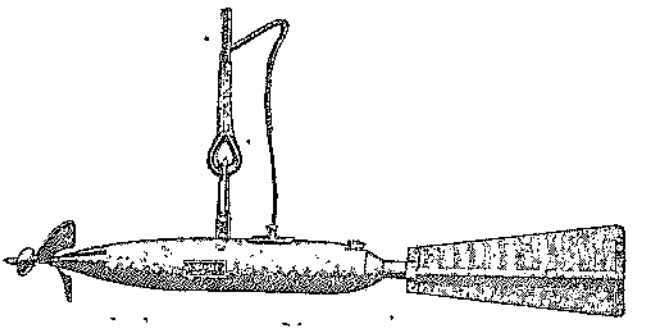


Рис. 81. Торпедовидная вертушка Ганзера.

Из употребительных в Зап. Европе конструкций следует еще отметить вертушки старейшей швейцарской фирмы *Амслера*. Новые модели этой фирмы имеют контактные камеры, наполненные маслом, и в основном обычное устройство (рис. 84). Для опускания на тросе характерен груз линзовидной формы, под которым помещается донный контакт. В Америке из вертушек на горизонтальной оси часто применяются вертушки *Гаскеля* с четырехкрылыми винтовыми лопастями (рис. 85) и с недавнего времени — вертушки *Хоффа* (рис. 86). Последние (трех- и четырехлопастные) отличаются тем, что лопасти у них плоские резино-

вые и лишь немного тяжелее воды (удельный вес 1,3). Благодаря этому трение в подшипниках уменьшается, равно как и инерция крыльев, и лопасти почти не страдают от ударов плавающих твердых тел. К устаревшим, но иногда еще встречающимся европейским конструкциям относятся вертушки *Амслера-Ляффона. Гайоша*, старые типы *Альбрехта, Амслера* и другие.

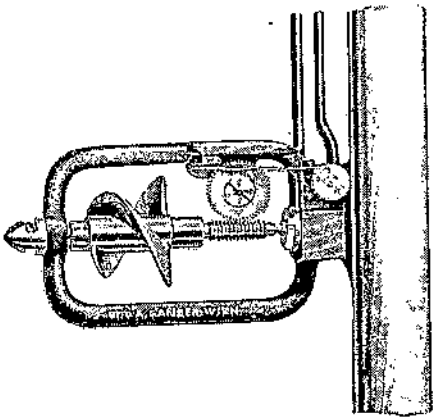


Рис. 82. Малая вертушка Ганзера.

Из союзных конструкций вертушек в последние годы все более широкое распространение находит вертушка *Владычанского-Жестовского*, представляющая усовершенствование масляной вертушки *Отта*, тип V.[1] В этой вертушке (рис. 87) контактная камера с зубчатым колесиком перенесена вперед — внутрь втулки лопастей и устроена в неподвижной оси, в которой высверлен канал для под-

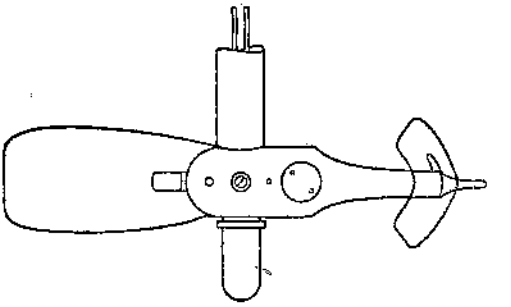


Рис. 83. Вертушка Ришара.

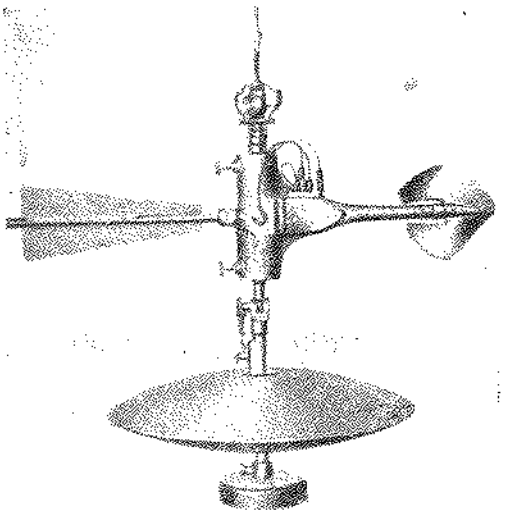


Рис. 84. Вертушка Амслера на тросе.

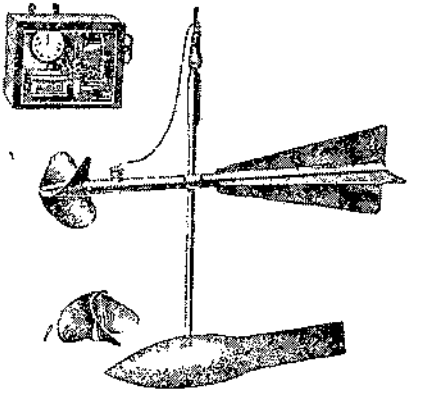


Рис. 85. Вертушка Гаскеля.

вода изолированного провода. Зубчатое колесико приводится в движение винтовой нарезкой на внутренней поверхности втулки. Ка-

[1] Эти вертушки изготовляются в Аксае (близ Ростова н/Д) в мастерских ГУГМС и на Опытном заводе при Московском институте инженеров водного хозяйства и мелиорации.

мера, подшипники и зазоры заполняются маслом, как и в вертушке *Отта*. Лопасти той же формы и размера, что у *Отта*, контакт через 10 или 20 оборотов.

Не получили большого распространения весьма простая вертушка *Крылова* («Волга», 1918 г.), с контактом при помощи штифта, упирающегося во вращающийся на оси вертушки диск из эбонита с металлической вставкой, и оригинальная по замыслу вертушка *Грищука* (1927 г.), в которой контакт осуществлялся каплей ртути, перекатывающейся внутри вращающегося от оси вертушки целлулоидного барабанчика.

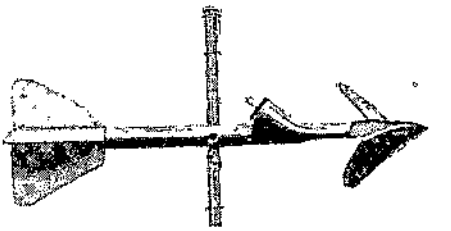


Рис. 86. Вертушка Хоффа.

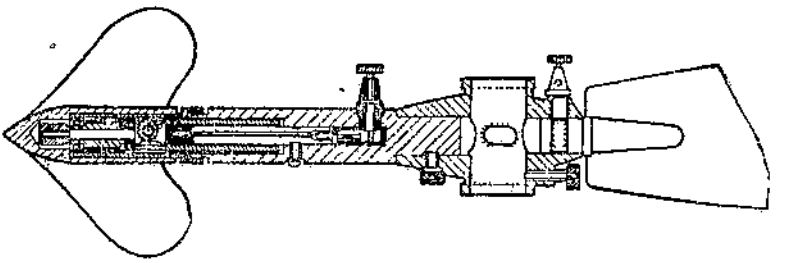


Рис. 87. Разрез вертушки Владычанского-Жестовского.

§ 28. Вертушки на вертикальной оси. Вертушки с вертикальной осью вращения особенно широко распространены в США и в большинстве стран, где принят английский язык, почему у нас они и получили название американских. Главным их представителем является вертушка *Прайса*, изобретение которой относится к 1885 г. Эти вертушки *чашечные*, действующие на принципе *Робинзонова креста*, который употребляется в качестве анемометра для измерения скорости ветра и основан на том, что движущаяся жидкая масса (воздух, вода) оказывает большее давление на вогнутые поверхности, чем на выпуклые. Чашки имеют форму полушарий, конусов или параболоидов, числом 4, 5 или 6, расположенных вершинами по окружности одна за другой и скрепленных между собой рамкою с осью вращения в центре.

В США раньше изготовлялись вертушки системы *Прайса* трех размеров: малая, средняя и большая, однако потом было найдено, что две последние модели дают менее точные результаты и не столь удобны в обращении, как малая; поэтому их изготовление было прекращено, а малая модель принята в качестве стандартного, общеупотребительного прибора.

Вертушки *Прайса* применяются как на штанге, так и на тросе, с акустической или электрической сигнализацией. На рис. 88 изображена вертушка на штанге, а на рис. 89 — на тросе. Вращающаяся часть вертушки состоит из шести конических чашечек, прикрепленных рамкой к вертикальной оси, нижняя часть которой имеет форму опрокинутого стаканчика, опирающегося на острие из твердой стали (рис. 90). Стаканчик окружен вращающейся вместе с ним муфточкой с винтовой нарезкой; если поворачивать последнюю так, чтобы она вывинчивалась (придерживая колесо), то, упираясь нижним концом в тело вертушки, она приподнимает стаканчик над опорным острием, застопоривая колесо. В таком состоянии вертушка должна находиться, когда она не работает.

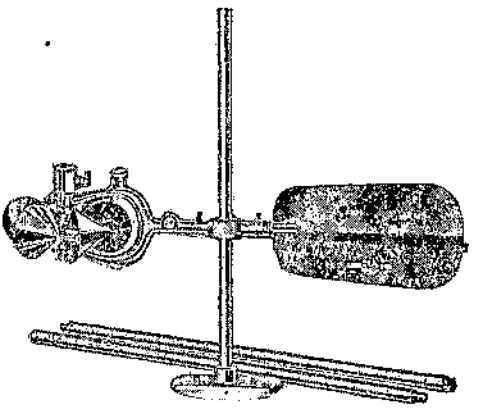


Рис. 88. Вертушка Прайса на штанге.

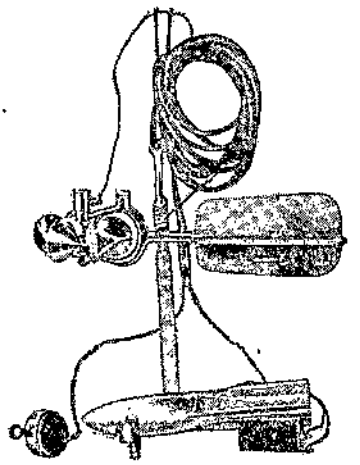


Рис. 89. Вертушка Прайса на тросе.

Верхний конец оси проходит в контактную коробочку, помещающуюся над ним, и имеет винтовую нарезку для присоединения к зубчатому колесику и выше — эксцентрик. Устройство контактной коробочки зависит от того, употребляется ли электрический контакт (через пять, десять или через один оборот), или акустическая сигнализация. В первом случае в коробочке имеется зубчатое колесико с обычным устройством (20 зубцов и 2 или 4 контактных штифтика). Для контакта через один оборот может вставляться другая коробочка (сменная), вводящая в действие эксцентрик. Обе коробочки имеют снаружи зажим для присоединения провода (другим проводом служит трос или штанга), а сверху — завинчивающуюся крышку с кожаной прокладкой (на рис. 89 сменная коробочка видна внизу перед рыбовидным грузом). В новейшем типе вертушки *Прайса* контактная камера одна и имеет два зажима, как на рис. 90.

При пользовании акустической сигнализацией коробочка закрыта сверху покрышкой, имеющей металлическую диафрагму. Вместо контактного рычажка устроен молоточек, приводимый в движение таким же зубчатым колесиком и ударяющий по диафрагме через 5 оборотов вертушки. К звуковой камере присоединена трубка (она

же штанга), выведенная наверх к телефону; в этом случае вертушка не имеет хвоста.

Прикрепление вертушки к тросу ясно из чертежа (рис. 89). Хвост состоит из двух взаимно перпендикулярных плоскостей, из которых одна (горизонтальная) может быть снята. Для уравновешивания всей системы, на вертикальной плоскости хвоста имеется передвижной грузик.

Штанга (при электрической сигнализации) может ввинчиваться в специальное гнездо (правее контактной камеры на рис. 88 и 89), но часто устраивается также приспособление, позволяющее передвигать вертушку вдоль штанги (специальная вставка с отверстием для штанги между вертушкой и рулем, как на рис. 88).

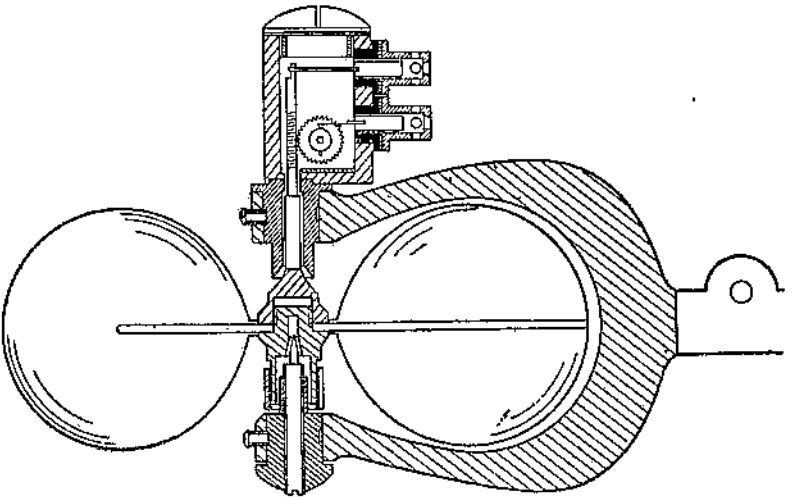


Рис. 90. Разрез вертушки Прайса.

Простота устройства вертушки *Прайса*, легкость ее, отсутствие шариковых подшипников и защищенность точки опоры оси вращения делают ее незаменимой при измерении в мутной воде горных речек, несущих много песку, камней и грязи. Однако надо иметь в виду, что эта вертушка измеряет всегда максимальную скорость течения. Руль у нее служит лишь для того, чтобы установить в определенном направлении раму прибора и придать (при опускании на тросе) вертикальное положение оси вращения. В связи с этим она употребляется чаще всего на тросе или закрепленной на конце штанги. Вертушки с акустической сигнализацией удобны преимущественно для работы на малых глубинах. Они постепенно вытесняются вертушками с электрической сигнализацией.

В СССР начало изготовления вертушек *Прайса* (с небольшими видоизменениями и исключительно с электрической сигнализацией) было положено в 1927 г. Опытно-исследовательским институтом водного хозяйства в Ташкенте (вертушки марки «ИВХ»).

Незначительные отличия от описанной конструкции имеет другая применяемая в США вертушка системы *Эллиса*. Она имеет четыре конических чашечки, окруженных цилиндрической клеткой,

предохраняющей прибор против плавающих тел, и употребляется, главным образом, на глубоких реках и при работах в море.

§ 29. Вертушки для определения направления течения. Определение, наряду с величиной скорости, направления течения имеет большой научный и практический интерес как для выяснения полной картины течений, так и для измерений, связанных с определением расходов рек в устьях, подверженных приливам, и особенно при изучении морских течений.

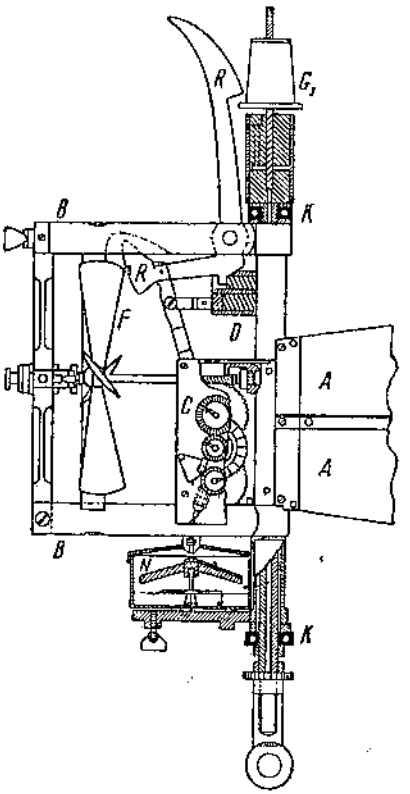


Рис. 91. Вертушка Экмана.

Первое обстоятельное изучение речных течений в России на рр. Днепре и Десне, о котором уже упоминалось, производилось *Лелявским* в последних годах прошлого столетия при помощи сконструированного им «*подводного флюгера*», представляющего комбинацию вращающихся плоскостей со сложным оборудованием для определения углов отклонения струй в горизонтальном и вертикальном направлениях. Применяемые в настоящее время с этой целью вертушки имеют приспособления для определения направления скорости обычно только в одной горизонтальной плоскости, что представляет наибольший интерес с практической стороны. Из разнообразных морских приборов этого рода *(Пильсбери, Вольтмана, Экмана, Якобсона* и новейших *Керуверса* и *Свердрупа)* остановимся на одной вертушке *Экмана,* которая у нас находит применение и при речных исследованиях, так как почти все эти приборы имеют общий принцип действия, основанный на применении компаса.

Вид вертушки *Экмана* (1905 г.) показан на рис. 91. Она опускается на тросе с повешенным снизу грузом и имеет свободное вращение вокруг вертикальной оси на шариках *K* под действием хвоста *A*. В рамке *B* на горизонтальной оси с остриями укреплены четырехкрылые алюминиевые лопасти *F*, окруженные защитным цилиндрическим ободком. Винтовая нарезка на оси соединяется с механическим счетчиком, состоящим из трех зубчатых передаточных колес, помещенных в коробке *C* и снабженных снаружи циферблатами со стрелками-указателями для отсчета десятков, сотен и тысяч оборотов.

При опускании прибора в воду лопасти застопорены рычагом *RR*, верхний конец которого прижимается к тросу под действием пружин *D*. Когда вертушка опущена на необходимую глуби-

ну, по тросу с судна пускается так называемый *посыльный груз* G_1, отодвигающий рычаг ровно настолько, что вырезка на его левом конце освобождает задерживающий зуб на крыле F, и вертушка начинает вращаться. По истечении некоторого времени, отсчитываемого на судне (через 5—10 минут), по тросу пускается второй груз большего диаметра, надевающийся на груз G_1 и отодвигающий рычаг RR еще более, благодаря чему лопасти опять застопориваются.

К оси прибора KK под счетчиком прикреплена компасная коробка, которая на дне разделена на 36 секторных отделений, по 10° каждое. Магнитная стрелка N имеет над острием чашечку и от нее желобок вдоль своего северного конца, по которому скатываются бронзовые шарики из трубки над отверстием в центре крышки компасной

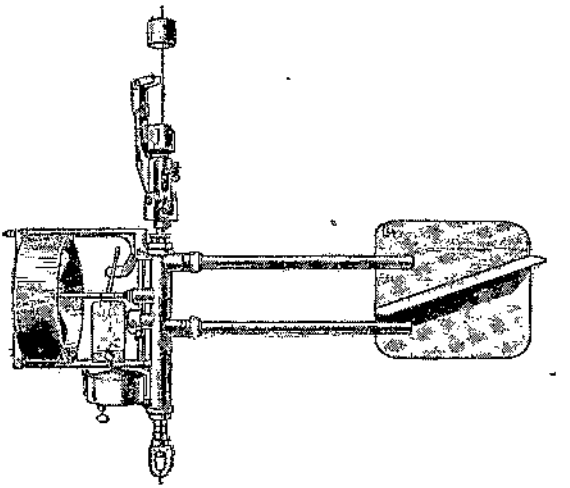


Рис. 92. Вертушка Экмана-Мерца.

коробки. Шарики помещаются в ячейках одного из зубчатых колес счетчика и выпадают в трубку по одному через каждые 50 оборотов крыльев вертушки (или через 33 1/3 оборота). Таким образом, шарики попадают в те отделения, которые отвечали положению руля AA относительно стран света. Шарики могут быть пронумерованы, и тогда при переменах направления течения во время действия прибора можно определить последовательность и продолжительность этих перемен. При скоростях течения в 0,04 *м/сек* можно уже через 10 минут выяснить направление течения.

В дальнейшем эта вертушка подверглась небольшим изменениям и улучшениям (вертушка *Экмана-Мерца*, рис. 92), с сохранением однако основного принципа действия.

Неудобство вертушек этой системы является общим для всех вертушек с механическим счетчиком, которые нужно вынимать из воды всякий раз после измерения в данной точке. Кроме того, точность определения углов до 10° не всегда является достаточной. В вертушках Свердрупа («*бифилярной*» и «*компасной*») применена электрическая передача с автоматической записью чисел оборотов вертушки и направления течения.

Бифилярный (в переводе двухниточный) подвес вертушки позволяет использовать для определения направления течения вертушки любых систем. Подвес, показанный на рис. 93, прикрепленный к стреле, может вращаться вокруг вертикальной оси, благодаря шариковому подшипнику, вместе с горизонтальным лимбом, над которым помещается неподвижная стрелка-указатель. Таким образом углы между направлением течения и известным направлением указателя сразу отсчитываются на лимбе.

Более точное определение направления течения производится так называемой *американской вертушкой*, по принципу которой сконструированы и тросовые вертушки Отта, типы VI-h и VII-h (с магнитной контактной камерой).

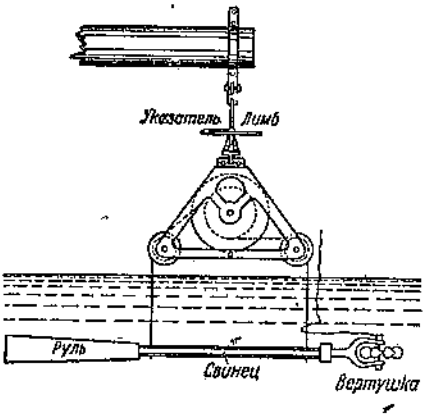


Рис. 93. Бифилярный подвес.

Вертушка типа VII-h (рис. 94) по сравнению с уже рассмотренными ранше имеет наполненную керосином компасную коробку *M*, в которой под плоувучей шкалой компаса *B* (рис. 95) находится на неподвижной оси колесо *C* со 180 зубцами. Эти зубцы зацепляются собачкой *E*, перемещаемой якорем электромагнита *D*, каждое притягивание которого поворачивает зубчатое колесо на один зубец, т. е. на 2 градуса. Прерывистым током от батареи *B* при помощи автоматического прерывателя *K*, соединенного с часовым механизмом, который вместе со счетчиком находится над поверхностью воды перед наблюдателем, собачка *E* поворачивает колесо *C* до тех пор, пока контактный штифт *F* не коснется контакта *G* (на 0°) у шкалы, которая при этом останавливается. Вследствие этого ток направляется через другой электромагнит *H*, якорь которого освобождает шкалу и отстраняет от зубчатого колеса задерживающую и толкающую собачки. Пружина возвращает зубчатое колесо в начальное положение, готовое для нового измерения. От батареи к корпусу вертушки идет неизолированный провод, служащий одновременно для сигнализации оборотов лопастей и для донного контакта.

Автоматический счетчик на поверхности имеет точно такие же электромагниты *D'* и *H'* и зубчатое колесо *C'* как вертушка, только вместо плоувучей компасной

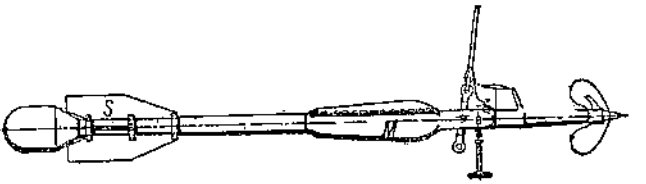


Рис. 94. Вертушка Отта VII-h с указателем направления течения.

шкалы устроен неподвижный лимб, разделенный через 2°, по которому отсчитывается указываемое стрелкой от зубчатого колеса направление течения. Автоматический прерыватель тока дает три контакта в секунду, и продолжительность каждого наблюдения пропорциональна азимуту направления оси вертушки, не превышая 1 минуты.

Для производства измерения надо лишь нажать кнопку *P*, от чего собачка *E'* отходит от зубчатого колеса, которое под действием пружины возвращает стрелку на нуль. Одновременно освобождается якорь электромагнита *H'*, замыкая другую цепь в точке *a*. С этого момента от создаваемых прерывателем *K* замыканий тока начинают в такт работать электромагниты *D'* и *D*, передвигая зубчатые колеса до прикосновения штифта *F* к контакту *G*, после чего снова возбуждаются электромагниты *H'* и *H*, и делается отсчет.

Эта вертушка может применяться при глубинах до 100 м. Для более глубоких измерений можно устроить механизм указателя самопишущим (для записи скорости, направления и времени) и опускать его в воду вместе с подвешенной к нему на коротком кабеле вертушкой.

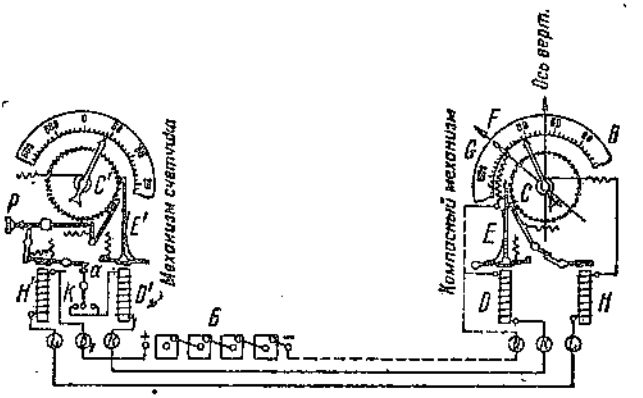


Рис. 95. Схема действия указателя направлений.

Фирма *Отта* изготовляет также штанговые вертушки («Потомак»), позволяющие определять направление течения в одной заданной плоскости. При желании измерить углы в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной) употребляются две таких вертушки, соответственным образом укрепленные на одной штанге (рис. 96). Принцип действия вертушки этого типа основан на том, что она дает два контакта на каждый оборот зубчатого колесика, отвечающий определенному числу оборотов крыльев. Один контакт, обыкновенный, зависит только от величины скорости течения, а второй — еще от того, как повернута ось вертушки по отношению к нормальному нулевому ее положению, и наступает раньше или позже первого в соответствии с направлением и величиной угла поворота.

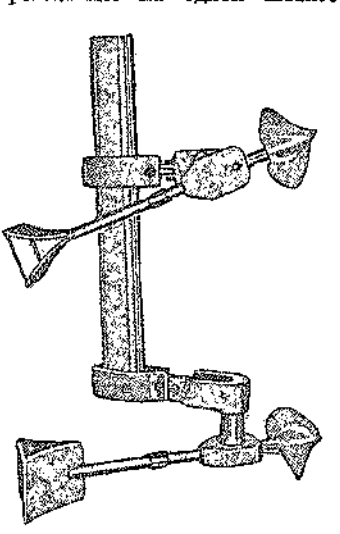


Рис. 96. Вертушки Отта „Потомак".

Запись контактов производится на ленте самопишущего прибора, отмечающего также каждую секунду (ом. § 31), откуда находятся сдвиги контактов по времени, а по ним — углы отклонения оси вертушки от нормального положения.

Для определения направления течения штанговыми вертушками *Владычанский* (1924 г.) предложил снабжать их *«свободным» рулем*, состоящим из двух вертикальных, сходящихся под острым углом плоскостей и подвешенным на шарнирах позади корпуса вертушки (рис. 97). Горизонтальная ось вращения вертушки устанавливается перпендикулярно к створу, руль же располагается самостоятельно по направлению течения.

На штангу над поверхностью воды надевается угломер, имеющий вынос со штифтом, прикрепленный к вращающемуся вокруг штанги лимбу. При совмещении связанного со штангой указателя с нулем лимба, оси штифта, штанги и вертушки находятся в одной вертикальной плоскости, перпендикулярной к линии створа. Штанга устанавливается по круглому уровню, помещающемуся на угломере, так, чтобы штифт приходился в точке скоростной вертикали (метка на мостике или на разметочном, перетянутом поперек реки тросе). Если направление течения в горизон-

тальной плоскости не совпадает с осью вертушки, то «свободный» руль отклонится, включая особый контакт и подавая сигнал (звонком или оптический). Поворачивая штангу около ее оси до прекращения сигнала, надо затем вернуть штифт на первоначальную точку, повернув лимб вокруг штанги, и прочесть по нему непосредственно угол отклонения. Для работы большими вертушками, опускаемыми с понтона на подвесных штангах, *Владычанским* предусмотрены особые конструкции контактов, указателя отклонений и отражательного угломера.

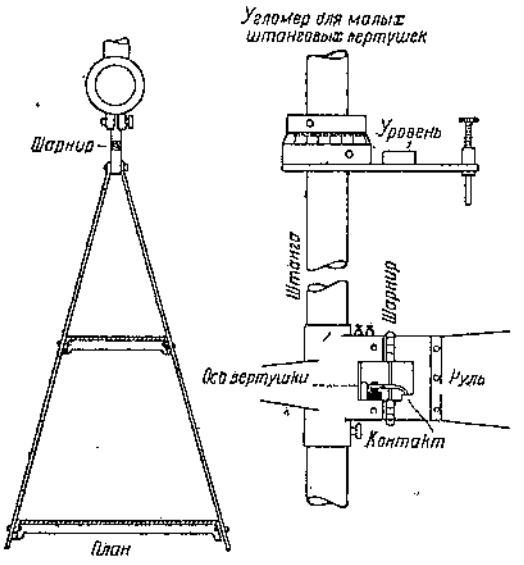


Рис. 97. „Свободный руль" Владычанского.

Некоторые отличия от описанных приборов представляет *речной флюгер Жуковского*, состоящий из вертушки, опускаемой на штанге, и приспособлений, позволяющих отсчитывать углы отклонения оси вертушки в горизонтальной плоскости от некоторого начального направления (перпендикулярного к линии створа). Прибор допускает видоизменения и для отсчета вертикальных углов отклонения оси вертушки от горизонтального ее положения и, подобно прибору *Владычанского*, не имеет компаса.

§ 30. Опускание вертушки на штанге и на тросе. Штанги для опускания вертушки могут иметь, как уже указывалось, разнообразные формы поперечного сечения. Применявшиеся иногда в старых конструкциях квадратные штанги теперь не употребляются вовсе. Наиболее употребительны трубчатые металлические штанги круглого, овального и яйцевидного сечения, изображенные на рис. 98.



Рис. 98. Сечения штанг для вертушек.

Круглые штанги без направляющей продольной планки (рис. 98-*а*) обычно применяются для небольших вертушек, закрепляемых на штанге. Штанги с продольной планкой, прорезью и т. п. не позволяют вертушке поворачиваться вокруг оси штанги и удобны для перемещения вертушки вверх и вниз в определенной вертикальной плоскости. Прорезь вдоль штанги, благодаря которой поддерживающий вертушку кабель или трос может пропускаться внутрь, сильно ослабляет поперечное сечение штанги и ее сопротивление изгибу. Штанги типа *d* с двумя продольными планками применялись при работах на Рейне (в 1895—1897 гг.) при диаметре 11 *см*, толщине стенок 1 *см* и глубинах до 10 *м*.

Наиболее прочными являются штанги овального и яйцевидного сечения (рис. 98-*е* и *f*), изготовляемые из цельнотянутых труб без шва. Разумеется, во всех этих случаях муфте вертушки придается такое же внутреннее поперечное очертание. Длина соединяемых между собой звеньев штанги может быть весьма разнообразной (например, у *Отта* от 0,5 до 3 *м*). Деления наносятся также на различных расстояниях — через 1, 5, 10 и 50 *см* (или в других мерах).

Различаются два способа опускания вертушки на штанге: 1) *на упорной штанге* и 2) *на подвесной штанге.*

В первом случае *(способ Гарляхера)* штанга упирается в дно, а вертушка скользит по ней и устанавливается на нужных глубинах при помощи кабеля, троса или вспомогательной штанги (см. рис. 72), а при малых глубинах и небольших вертушках последние закрепляются на штанге зажимными винтами для измерения скорости в каждой точке. На нижний конец штанги навинчивается так называемый *поддон,* препятствующий ее углублению в грунт дна, крестообразный или тарельчатый (рис. 75, 99) при вязком грунте.

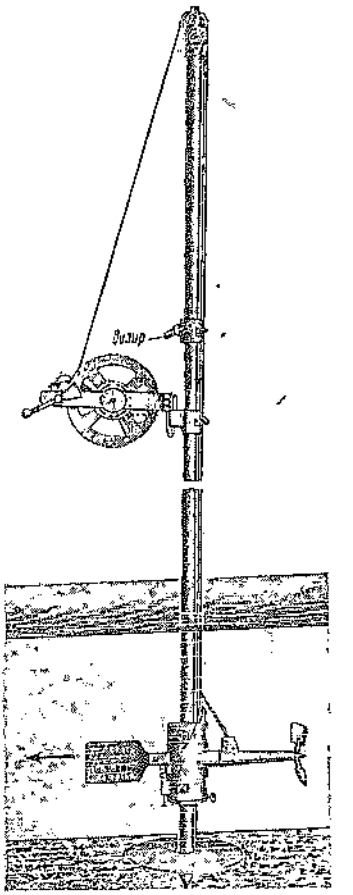


Рис. 99. Подъемный барабан на штанге.

Для придания нужного направления горизонтальной оси вращения вертушки (чтобы она была перпендикулярна к линии створа) служит *визир* (рис. 99), закрепляемый на штанге над поверхностью воды, обычно в форме короткой горизонтальной трубки, ось которой перпендикулярна к оси вертушки. Визир прикреплен к муфте с прорезом, как у вертушки, и может передвигаться по штанге и закрепляться на ней зажимным винтом. Штанга по визиру устанавливается, ориентируясь на береговой створный знак, разметочный трос, край мостика и т. п. Тот же визир очень удобен в качестве ручек для поворачивания штанги и держания ее. Иногда на муфте визира имеется и зажимное приспособление для закрепления троса, поддерживающего вертушку.

Для подъема и опускания вертушки по штанге очень удобны барабаны, надевающиеся на штангу (рис. 99) и снабженные циферблатом со стрелками, по которым отсчитывается глубина погружения вертушки. С этой целью после установки штанги вертушка приводится в такое положение, чтобы ее ось была вровень с поверхностью воды, затем стрелки переводятся на нуль. Тогда при опускании вертушки они позволяют сразу читать глубину ее погружения.

Чтобы измерить полную глубину до дна, вертушку опускают до поддона (отсчет делается при сигнале донного контакта) и к полученному отсчету прибавляют постоянную высоту (для данной вертушки) от оси до низа вертушки.

В барабанах *Отта* большая стрелка на циферблате показывает сантиметры, а малая метры, трос служит одновременно и кабелем, для чего на барабане помещены зажимные винты для приключения проводов к звонку и батарее. Специальные барабаны изготовляются для опускания тросовых вертушек (рис. 100).

При опускании на подвесной штанге *(способ Эпера)* вертушка наглухо закрепляется на нижнем конце штанги и перемещается вверх и вниз вместе с ней.

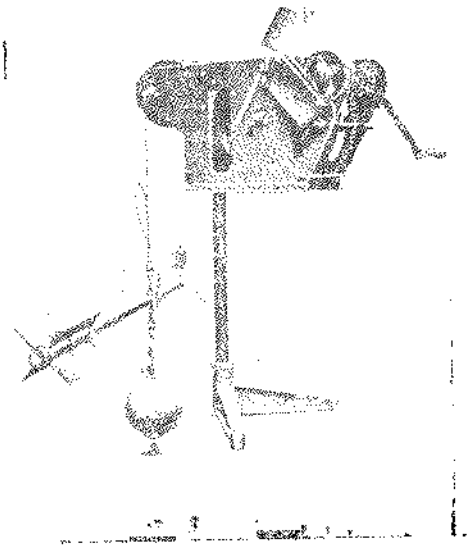


Рис. 100. Лебедка для тросовой вертушки.

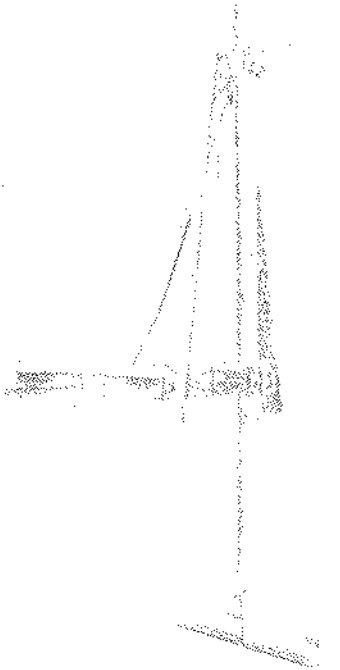


Рис. 101. Штангодержатель Амелера.

Этот метод имеет то достоинство, что даже при очень быстром течении не может быть сомнений относительно глубины погружения вертушки, а электрические провода с удобством могут быть помещены внутри штанги. Изгиб свободного конца штанги течением может быть устранен применением оттяжек. Метод *Эпера* очень хорош также для рек с легко размываемым руслом, где опертая на дно штанга может осесть во время измерений.

Для поддержания штанг устраиваются специальные *штангодержатели* разных типов. Один из них изображен на рис. 101. Штанга вставлена в два расположенных одно над другим гнезда держателя и закреплена зажимами или сквозными поперечными штифтами. Это приспособление чрезвычайно удобно для установки на мосту или пароме, и для него пригодно большинство штанговых вертушек.

Есть вертушки, специально приспособленные только для такого способа опускания: они наглухо соединены со штангой, в которую пропущены провода для сигнализации (например вертушки Ришара). Иногда на штангу надевается несколько вертушек, расположенных в определенных точках по высоте.

Тросовые вертушки приходится применять, как уже указывалось, при больших глубинах и скоростях течения. Основной их недостаток — в том, что они очень легко вращаются около точки подвеса во всех направлениях, стремясь принять постоянно меняющееся (пульсирующее) направление течения. Самая точка подвеса тоже не остается неподвижной, а кроме того вертушка относится течением, даже несмотря на груз, что вносит ошибку в измерение глубины ее погружения.

Чтобы измерить действительную глубину X погружения вертушки (рис. 102), необходимо определить угол α отклонения троса от вертикали (при помощи отвеса и транспортира). При небольших

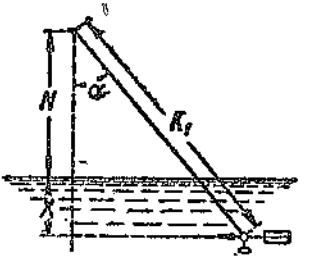


Рис. 102. Относ вертушки на тросе.

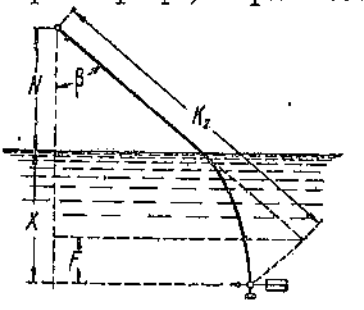


Рис. 103. Относ вертушки при больших глубинах.

скоростях и глубинах, принимая линию троса за прямую, можно написать:

$$X = K_1 \cos\alpha - N. \qquad (73)$$

При больших глубинах (рис. 103) кривизна троса может быть значительной, а точное вычисление глубины погружения вертушки X_1 сложно и затруднительно (надо учесть вес вертушки с грузом, давление воды на вертушку, груз и трос и углы отклонения троса от вертикали в верхней части и у вертушки). Приближенно можно принять, что

$$X_1 = K_2 \cos\beta - N + F, \qquad (74)$$

где K_2 — длина троса, а F — ошибка, трудно поддающаяся учету: при глубинах около 7 *м* она может составить до 10% от X; при тонких тросах и большом весе вертушки с грузом величина F уменьшается. Для точных измерений существуют специальные таблицы поправок глубин с учетом веса и формы груза, диаметра троса, его длины и угла отклонения от вертикали в точке подвеса.

Отмеченные недостатки тросовых вертушек приводят к стремлению во многих случаях расширить область применения штанги, хотя бы дорогими и требующими большого обслуживающего персонала приспособлениями (например, на Рейне), допуская вертушку

на тросе только при высокой воде, когда важнее быстрое и безопасное производство измерений, чем высокая их точность. Несмотря на это, вертушки на тросе быстро распространяются, так как для гидрометрических работ часто оказывается выгодным именно это оборудование, когда река слишком глубока и бурна для штанги, или наблюдатель помещается слишком высоко над поверхностью воды, или, наконец, приходится считаться с отсутствием рабочей силы. В связи с этим тросовые вертушки подверглись таким усовершенствованиям, что результаты, даваемые ими, оказываются почти такими же точными, как и с вертушками на штанге.

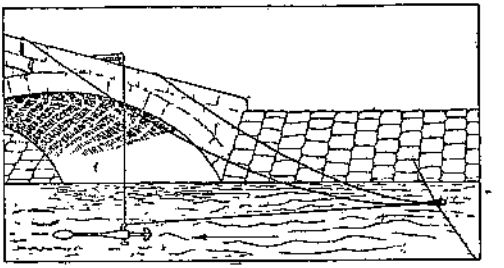


Рис. 104. Применение оттяжных тросов.

Необходимыми принадлежностями вертушек на тросе являются, как мы уже видели, подвесной груз и подъемное приспособление в виде лебедки или барабана, по которому производится отсчет глубин. Кроме того, хвост в этих вертушках играет особо важную роль, заставляя вертушку принимать надлежащее положение в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Хорошей мерой для уменьшения относа вертушки является и в этом случае применение оттяжных тросов (например, как на рис. 104).

Иногда устраивается канатная система, позволяющая с берега передвигать вертушку поперек течения и опускать ее на нужную глубину (рис. 105).

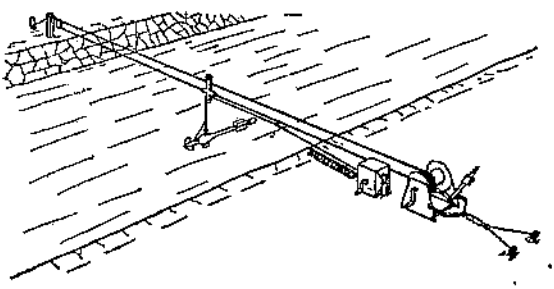


Рис. 105. Управление вертушкой с берега.

§ 31. Принадлежности оборудования и уход за вертушкой. Из сказанного уже в общем ясно, какие принадлежности нужно иметь, чтобы производить измерения скоростей вертушкой с электрической сигнализацией. Таковыми являются:

1) для штанговых вертушек:

а) штанги (с поддоном, визиром, блоками и зажимами),

б) поддерживающие приспособления — штангодержатели, лебедки (для поднимания вертушки и штанги), оттяжные тросы,

в) секундомер,

г) электрическое оборудование — провода (кабель), батарея, звонок или телефон;

2) для тросовых вертушек:

а) трос и подвесные грузы,

б) лебедки и оттяжные тросы,

в) секундомер,

г) электрическое оборудование.

Кроме этих основных приборов, уже рассмотренных выше, при работах на больших реках и со специальными научно-исследовательскими целями могут применяться более сложные электрические приспособления, к каковым можно отнести:

а) счетчик оборотов,

б) распределительную доску,

в) хронограф и др.

Электрический счетчик оборотов (*B* на рис. 106) присоединяется к контакту вертушки через один оборот (другой провод — к телу вертушки), причем в цепь включается батарея. Внутреннее устройство счетчика состоит из электромагнитов и зубчатых колес, поворачиваемых при каждом замыкании тока собачками, как это имеет место в механизме вертушки для определения направления течения (§ 29).

При помощи системы передаточных колес стрелки показывают на циферблатах: на одном — каждый оборот (до сотни), на другом — сотни оборотов крыльев вертушки. Благодаря нежному механизму счетчики часто портятся и пропускают

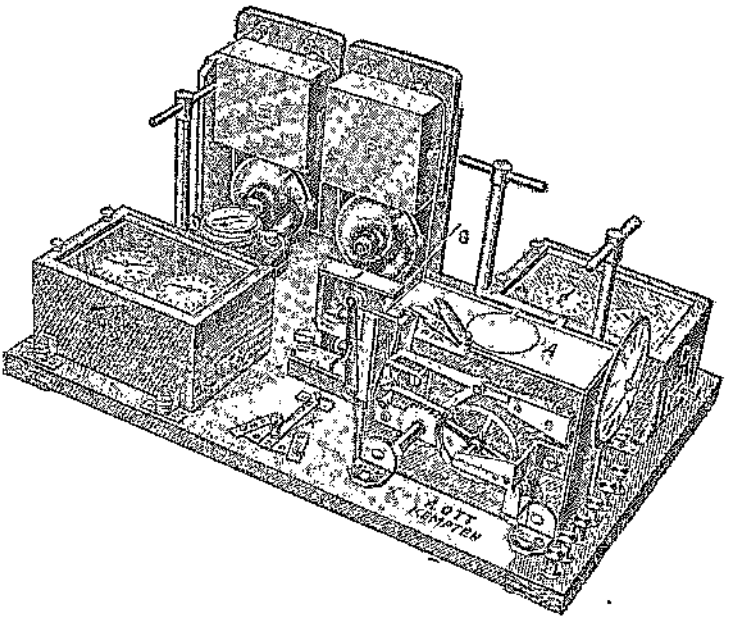


Рис. 106. Распределительная доска Отта.

обороты при ослаблении батареи или очень быстром вращении крыльев. В то же время хорошо работающий счетчик является чрезвычайно удобным прибором при измерениях.

Если при работах приходится одновременно пользоваться различными сигнальными и счетными приспособлениями, то последние располагаются на одной общей *распределительной доске*, чтобы их можно было сразу видеть и управлять ими.

Фирмой *Отта*, например, изготовляются распределительные доски, на которых помещаются (рис. 106):

а) часы для автоматического выключения тока через 100 или 200 секунд (*A*),

б) счетчик числа оборотов вертушки (*B*),

в) счетчик, показывающий глубину погружения вертушки (*C*),

г) реле для автоматической остановки обоих счетчиков по сигналу донного контакта и для включения звонка (*D*),

д) звонок для сигналов через 25 оборотов вертушки (*E*),

е) звонок для ручного контакта (*F*),

ж) гудок (зуммер), который по истечении 100 или 200 секунд напоминает об отсчете по счетчику оборотов (*G*),

з) миллиамперметр со штепсельными гнездами для включения в любую цепь (*I*),

и) выключатель батареи и иные переключатели (*K*),

к) зажимы для проводов.

Хронограф (рис. 107) представляет самопишущий прибор, напоминающий телеграфный аппарат с движущейся бумажной лентой. Перья чертят на этой ленте продольные линии, прерываемые скачками при замыкании и размыкании тока в соответствующей каждому перу цепи, благодаря действию электромагнитов. Например, одно перо может давать скачки с каждым оборотом вертушки, а другое — каждую секунду (если соединить его со специальным часовым механизмом). Тогда на ленте нетрудно подсчитать соответствующие числа оборотов вертушки и секунд. Особенно удобен хро-

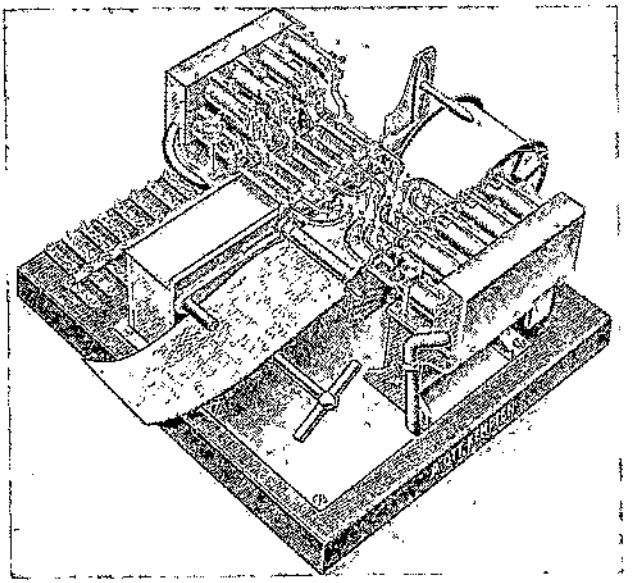


Рис. 107. Хронограф Отта с 16 перьями.

нограф при исследовании пульсации, для одновременной записи работы нескольких вертушек или при тарировке (см. ниже). Фирмой *Отта* выпускаются хронографы, имеющие от 3 до 18 перьев.

Что касается *ухода за вертушкой*, то необходимо иметь в виду, что вертушка — прибор очень нежный, чувствительный ко всякого рода повреждениям, а потому требует к себе весьма внимательного и бережного отношения. Особенно важно, чтобы крылья вертушки не подвергались ударам, изгибу или повреждениям, так как от этого зависят коэфициенты вертушки (см. ниже) и точность результатов измерений. После работы вертушка должна разбираться и чиститься, число шариков в подшипниках должно оставаться неизменным и полным, равным образом завинчивание шайбы, зажимающей ша-

1549

рики, должно быть каждый раз одинаковым, для чего ее положение отмечается чертой на ней и на теле вертушки. Особое внимание должно обращаться на очистку пружинных контактов и частей, подверженных окислению. При работе вертушки зимой она может покрываться на воздухе слоем льда; в этом случае нельзя удалять лед механическим путем, а надо опустить вертушку в воду, где лед растает. Проверка исправности вертушки производится перед работой путем пробы ее. Независимо от того, требует ли вертушка ремонта или нет, она должна быть перетарирована после определенного числа измерений — через 20—50 измерений расходов, в зависимости от условий работы (скоростей, числа точек измерений, мутности воды и пр.).

§ 32. Тарировка вертушек. Специальное испытание вертушки, которое носит название *тарировки*, имеет целью установить зависимость между секундным числом оборотов крыльев вертушки и скоростью течения. Только имея такую зависимость (в виде «*тарировочной кривой*» или *уравнения*, связывающего скорости течения с секундным числом оборотов), можно пользоваться вертушкой как измерительным прибором для определения скоростей течения, и, следовательно, данные тарировки являются совершенно необходимой и неотъемлемой принадлежностью каждой вертушки. Это — своего рода аттестат, указывающий поведение вертушки при разных скоростях течения. Даже вертушки одного типа и размера, выпускаемые заводами, тарируются каждая самостоятельно, так как невозможно при их изготовлении обеспечить точно одинаковое трение и условия работы, не говоря уже о том, что с течением времени эти обстоятельства меняются под действием разных причин и приводят к необходимости периодических повторных тарировок.

Тарировка представляет собой процесс, обратный тому, который имеет место при пользовании вертушкой как измерительным прибором, когда по числу оборотов крыльев узнается скорость; при тарировке нужно точно знать наперед скорости течения и определить соответствующие им числа оборотов крыльев. Задача эта представляет большие трудности, так как в такой постановке приводит к тому, что нужно измерить скорости течения другим точным прибором, который опять же должен быть как-то протарирован.

Неодинаковость скоростей в разных точках живого сечения потока не позволяет в данном случае прибегнуть к косвенному определению скорости — путем точного измерения расхода воды и площади живого сечения, так как таким образом мы узнаем только среднюю скорость в сечении, а вертушка по своему устройству определяет местные скорости в отдельных точках. Сравнение вертушки с поплавком также затруднительно и не может обеспечить необходимой точности.

Общепринятым является производство тарировки вертушек в *стоячей воде*, когда сама вертушка в ней передвигается с определенной равномерной скоростью. Меняя последнюю, можно наблюдать соответствующее каждой скорости секундное число оборотов. Конечно, при этом условия работы вертушки не совсем те, что в действительности, когда она установлена в турбулентном потоке и степень турбулентности потока отражается на точности результа-

тов измерений. В хороших условиях, при слабой турбулентности, можно полагать, что точность вертушечных измерений возможна до 1—2%; наоборот, при сильной турбулентности (например при выходе воды из турбинной камеры) можно ждать ошибок до 15—20%.

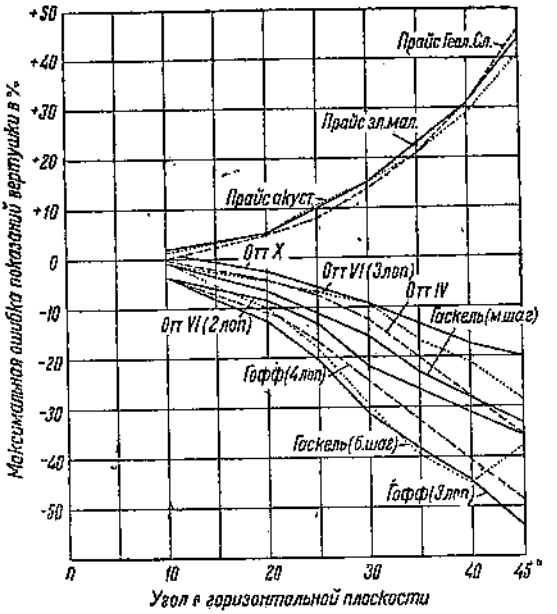


Рис. 108. Максимальные ошибки показаний вертушек при косых струях.

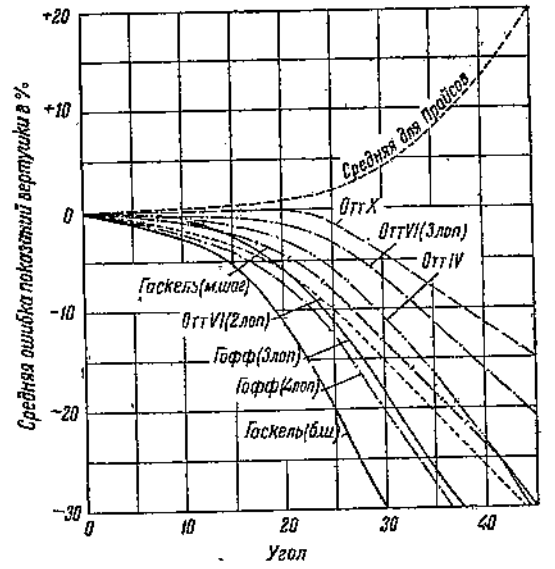


Рис. 109. Средние ошибки показаний вертушек при косых струях.

Влияние степени турбулентности потока на работу вертушек мало изучено. Американские инженеры *Ярнелл и Нэглер* в результате лабораторного исследования (1924—1926 гг.) 11 разных штанговых вертушек пришли к следующим выводам:

1) турбулентность потока может значительно отражаться на показаниях вертушек;

2) неправильность этих показаний имеет главной причиной не инерцию лопастей и пульсацию величины скорости течения, а косые удары струй;

3) при жестком закреплении вертушки на штанге параллельно общему направлению течения, турбулентный поток неизменно вызывает преувеличенные показания чашечных вертушек *(Прайса)* и преуменьшенные винтовых (с горизонтальной осью вращения).

На рис. 108 представлены графически результаты исследования вышеупомянутыми инженерами влияния *косины струй* в горизонтальной плоскости на показания вертушек.

Эти результаты осреднены для трех скоростей течения (0,6, 0,9, 1,5 *м/сек*), при которых производились исследования, так как последние показали, что влияние величины скоростей на процент ошибки при одних и тех же углах невелико. Так как некоторые типы вертушек дают значительную разницу показаний, в зависимости от

того, с какой стороны (справа или слева) к ним подходит течение, то на приведенном графике приняты во внимание более невыгодные условия подхода.

В турбулентном потоке, где струи ударяют в вертушку с одинаковой частотой со всех сторон, вертушки должны давать средние, меньшие ошибки, как это видно на рис. 109. В этих условиях ошибки чашечных вертушек значительно уменьшаются, так как при подходе струй сверху или снизу они переходят в отрицательные. Из рис. 109 видно, что для углов до 20° прекрасные результаты дает малая вертушка *Отта* (тип X).

В соответствии со сказанным, для учета турбулентности *швейцарские нормы* предусматривают тарировку вертушек в пяти положениях: нормальном и под углами оси в 5° к течению — вправо, влево, вверх и вниз (способ *Штриклера*).

Для получения истинных скоростей при сильной турбулентности иногда рекомендуется параллельная работа двумя вертушками — *Прайса* и одной из винтовых, с последующей интерполяцией показаний для сведения ошибки к минимуму.

Тарировка вертушек производится на так называемых *тарировочных станциях*, оборудованных специальными приспособлениями. Основной их частью является *тарировочный бассейн*, которым может служить естественный или искусственный канал или водоем. В зависимости от того, передвигается ли вертушка прямолинейно или по кругу, можно различать два типа бассейнов — *прямолинейный* и *круговой*.

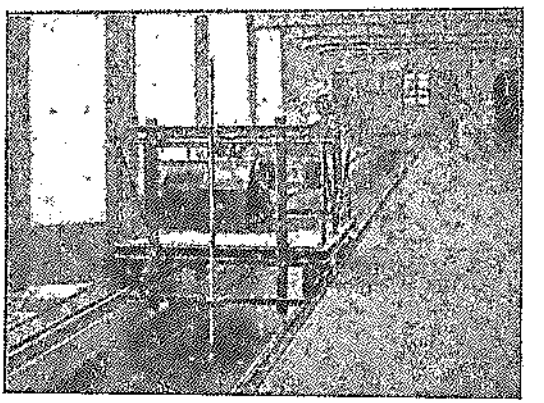


Рис. 110. Тарировочный канал Отта.

Наиболее совершенные устройства первого типа имеют специальные бетонные тарировочные каналы в закрытом помещении, над которыми передвигается тележка, приводимая в движение с любыми скоростями (обычно до 3—4 *м/сек.*) при помощи электромотора. Например, тарировочный бассейн в Вене представляет бетонный канал длиной 120 *м*, шириной по верху 1,5 *м*, по дну 1,0 *м* и глубиной 1,8 *м*. Вдоль одного рельса идет провод, питающий электромотор, вдоль другого расположены контакты для тележки через 5 и 10 *м*. Тарировочный бассейн фирмы *Отта* имеет длину 47 *м* и поперечное сечение канала 1,5 × 1,5 *м* (рис. 110).

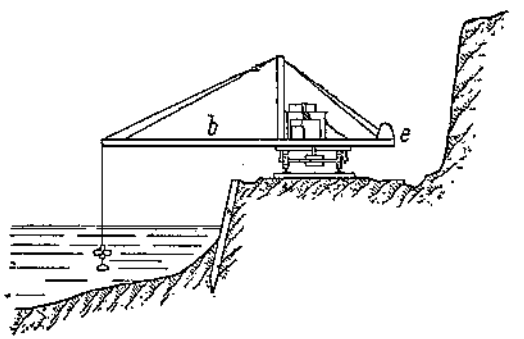


Рис. 111. Тетюшская тарировочная станция.

Ленинградский Опытовый судостроительный бассейн, предназначенный для испытаний моделей судов, производит также тарировку вертушек. Его длина около 120 *м*, ширина 6,7 *м* и глубина 3 *м*.

От размеров канала зависит в значительной мере точность результатов тарировки. Можно считать, что достаточной длиной канала является 50 *м*,

ширина же должна быть не менее 0,7—1,0 *м*. Глубина погружения в воду вертушки при тарировке обычно колеблется от 0,3 до 1,0 *м*.

В Ленинграде, кроме упомянутого прямолинейного Опытового судостроительного бассейна, существуют круговые тарировочные бассейны при Государственном гидрологическом институте и Научно-исследовательском институте гидротехники. В СССР тарировочные станции имеются в Полтаве, Москве, Одессе, Тетюшах (на Волге), Аксае (бл. Ростова н/Д), Тбилиси и Ташкенте.

Тетюшская станция устроена на берегу пруда, вдоль которого по рельсам движется тележка, толкаемая рабочими (рис. 111). Вертушка подвешена на тросе к коромыслу *b*, уравновешенному грузом *a*; длина пути около 100 *м*.

Тбилисская старая станция была устроена на Лисьем озере и имела вместо тележки плот, передвигающийся по бесконечному тросу (рис. 112), перекинутому



Рис. 112. Тбилисская тарировочная станция.

через блок, укрепленный на железной свае в 170 *м* от берега. Трос приводился в движение мотором, помещенным в постройке на берегу, а перемена скоростей достигалась комбинацией зубчатых колес и валов; хронограф находился на берегу. Новая станция имеет прямолинейный бассейн длиной 80 *м* и сечением 2×2 *м*.

Полтавская и Ташкентская (старая) станции имеют круговые бассейны, стоящие, вообще говоря, дешевле длинных прямолинейных и имеющие более простое оборудование (схема кругового бассейна дана на рис. 113). Результаты тарировки вертушек в таких бассейнах менее точны (хотя для практики вполне удовлетворительны), а кроме того, такие бассейны допускают только тарировку верту-

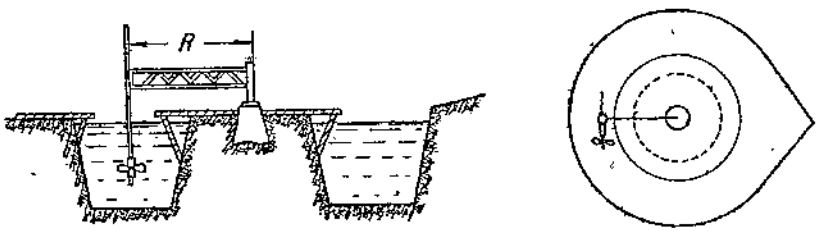


Рис. 113. Схема кругового тарировочного бассейна.

шек на штанге, так как вертушки на тросе подвергаются действию центробежной силы. Вода в бассейне постепенно вовлекается в круговое движение, что также влияет на точность результатов. Чтобы ослабить это явление, бассейну в плане придается неправильная или вытянутая форма или устраиваются поперечные перегородки (диафрагмы). Вертушка со штангой прикрепляется к коромыслу, вращающемуся вокруг вертикальной оси рабочим, который в такт по метроному шагает по меткам, сделанным на помосте. При этом вертушке могут быть сообщены скорости от 0,1 до 2,5 *м/сек.*, которые нетрудно вычислить по формуле

$$v = \frac{2\pi RN}{T}, \qquad (75)$$

где R есть длина коромысла, N — число его оборотов и T — соответствующее время в секундах.

Вид старого тарировочного бассейна в Ташкенте показан на рис. 114.

Особое внимание при тарировке должно быть обращено на то, чтобы вертушка тарировалась именно с теми приспособлениями,

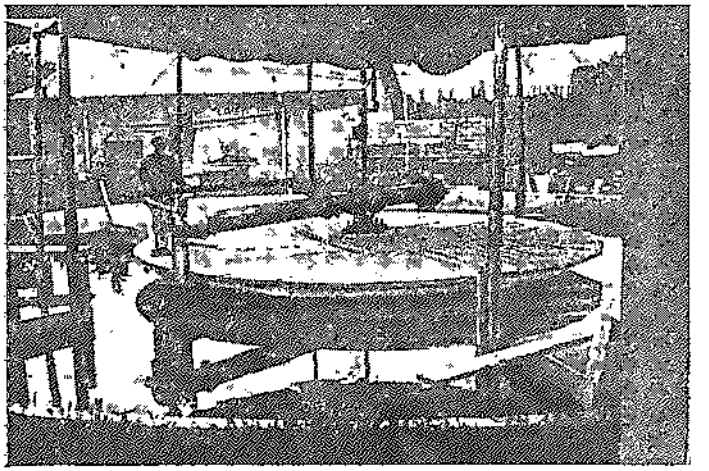


Рис. 114. Ташкентский тарировочный бассейн (старый).

с которыми она будет работать (штанга, трос, грузы), и при тождественном их положении (направление оси вертушки по отношению к движению, расстояние от нее до груза и т. п.).

Исследования, произведенные в этом направлении американским Бюро Стандартов для вертушки *Прайса*, показали, что в зависимости от размеров, числа грузов и их расположения по отношению к вертушке, а также величины скорости течения, следует вводить в вычисленные скорости поправочные коэфициенты, изменяющиеся от 0,96 до 1,03.

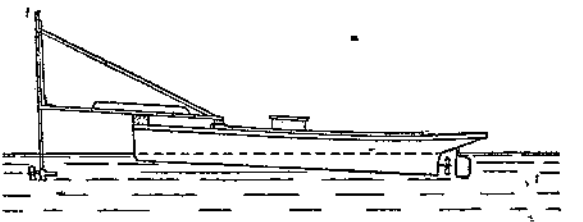


Рис. 115. Тарировка с моторной лодки.

Иногда по разным причинам нельзя воспользоваться тарировочной станцией и приходится тарировать вертушку в *полевой обстановке*. Такая тарировка будет, конечно, менее точной, но может быть удовлетворительной для практических целей и, главное, своевременной и не задерживающей измерений. С этой целью может быть приспособлена моторная лодка (рис. 115), впереди которой на особом выносе укреплена вертушка на штанге или через блок спущена вертушка на тросе. Вместо моторной лодки можно воспользоваться простой лодкой, прикрепив канаты или тросы — один к носу лодки, другой к корме. За первый канат с одного берега лодку тянут, вторым ее удерживают с другого берега, чтобы она двигалась прямолинейно и поступательно вдоль своей оси. Можно также перетянуть через

пруд (небольшое озеро, залив), в котором производится тарировка, постоянный канат и передвигать лодку вдоль него руками или при помощи ворота, установленного на самой лодке, или устроить бесконечный канат, перекинутый через два барабана, поставленные на берегах, один из которых равномерно поворачивается рабочим и тянет лодку. В последней помещаются наблюдатели, следящие за числом оборотов вертушки, временем и проходимым путем. Длина пути может отмечаться двумя способами: по разметкам, расположенным параллельно пути лодки, или при помощи створных знаков, определяющих постоянный отрезок пути.

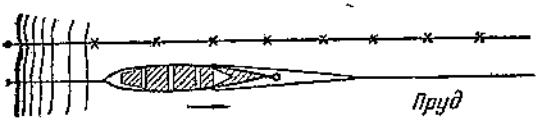


Рис. 116. Тарировка с простой лодки (схема 1).

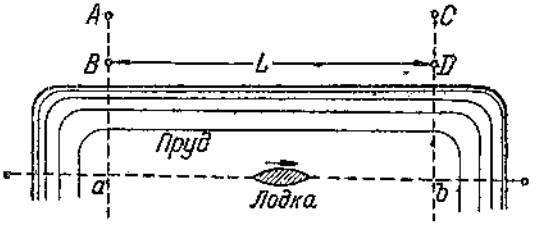


Рис. 117. Тарировка с простой лодки (схема 2).

В первом случае протягивается размеченный по длине трос (канат), висящий в воздухе или поддерживаемый поплавками, или устанавливается ряд вех через определенные расстояния (рис. 116). Наблюдатель определяет пройденный лодкой путь на глаз, с точностью до 0,2—0,5 *м*.

При втором способе на берегах при помощи вех устанавливаются два параллельных створа (рис. 117), фиксирующие постоянное расстояние *L*. Если тарируется вертушка с механическим счетчиком, то в точке *a* включается счетчик и пускается стрелка секундомера, а в точке *b* счетчик выключается и стрелка останавливается; при первом способе отсчета расстояний моменты начала и конца наблюдения произвольны.

Если тарируется вертушка с электрической сигнализацией, то при каждом звонке по первой схеме (рис. 116) делаются отсчеты времени и пройденного пути, а по второй (рис. 117) — отсчеты времени при каждом звонке и кроме того отсчеты в точках *a* и *b*, для чего удобно (но необязательно) иметь два секундомера: один для вертушки, другой для точек *a* и *b*.

Число поездок с вертушкой как при тарировке на постоянной станции, так и в полевой обстановке должно быть достаточным для того, чтобы исследовать работу вертушки в пределах скоростей, встречающихся на практике (от минимальных до максимальных), с необходимой подробностью и полнотой (обычно 15—30 поездок, исключая поездки, дающие сомнительные результаты, — например, при неравномерной скорости движения вертушки).

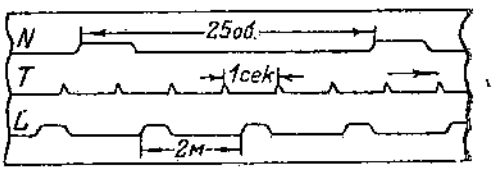


Рис. 118. Запись хронографа при тарировке вертушки.

В результате тарировки для каждой поездки получаются наблюдением три величины:

1) число оборотов крыльев вертушки *N*,

2) длина пути *L* (которая может быть постоянной),

3) время *T*, соответствующее величинам *N* и *L*.

На ленте хронографа получается непосредственная запись всех этих элементов. Например, на рис. 118 изображен отрезок ленты трехперого хронографа, отмечающего: 1) каждые 25 оборотов крыльев, 2) время через 1 секунду и 3) пройденный путь через 2 *м*.

Великанов в 1929 г. предложил *воздушную тарировку* вертушек в аэродинамической трубе. С этой целью в трубе на ее оси устанавливается испытуемая вертушка и на некотором расстоянии от последней, также по оси трубы, трубка *Пито*, соединенная с микроманометром (§ 39). Обороты вертушки и время регистрируются хронографом при разных скоростях воздушного потока в трубе, причем сначала наблюдается (через стеклянное окно) та скорость, при которой вертушка начинает вращаться.

Воздушная тарировка дает кривую того же вида, что и водяная тарировка (рис. 119), с той лишь разницей, что в воздухе вертушка начинает вращаться при скорости в 28 раз большей, чем в воде. Это обстоятельство позволяет определить эту скорость легче и точнее, чем в обычных тарировочных бассейнах, а кроме того, воздушная тарировка проще и требует меньше времени и места (достаточна аэродинамическая труба диаметром в 1 *м* при длине рабочей части 6—8 *м*). Пересчет воздушной тарировки в водяную также делается очень просто — путем уменьшения воздушных скоростей и соответствующих чисел оборотов крыльев вертушки в 28 раз. Предложение *Великанова* до настоящего времени практического применения не получило.

§ 33. Обработка тарировочных данных. Уравнения тарировочных кривых. Обработать полученные при тарировке данные для практического пользования можно двумя путями — графически и аналитически. Первый способ более прост и заключается в проведении тарировочной кривой по точкам, нанесенным на обыкновенную клетчатую бумагу (миллиметровую) на основании данных тарировки: каждому секундному числу оборотов крыльев вертушки $n = \frac{N}{T}$ соответствует своя скорость $v = \frac{L}{T}$. При втором способе устанавливается вид уравнения тарировочной кривой $v = f(n)$ и его коэфициенты.

На рис. 119 изображена тарировочная кривая вертушки *Отта* (тип IX-а), построенная по 21 точке. При проведении таких кривых, которые всегда прилагаются к выпускаемым вертушкам, масштабы выбираются с таким расчетом, чтобы наклон кривой к осям был около 45° или не меньше 30° — для удобства и большей точности отсчетов.

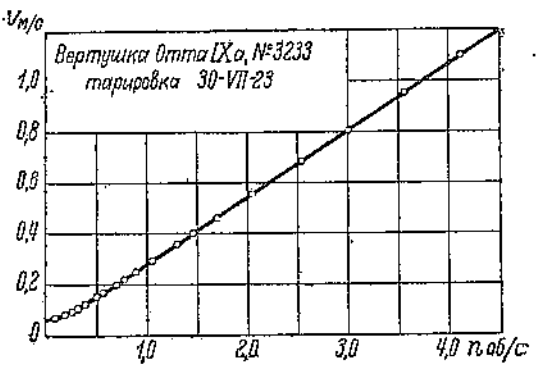


Рис. 119. Тарировочная кривая вертушки.

Как видно, кривая ясно выражена только у начала координат, дальше она переходит в *прямую линию*. Для большинства вертушек с достаточной для практики точностью можно принять, что тарировочная кривая представляет прямую линию при скоростях больше 0,5 *м/сек.*, поэтому эта ее часть и проводится по линейке. Кривизна нижней части определяется расположением точек, и здесь кривая проводится по лекалу. Иногда и в этой части ее можно заменить прямой или ломаной линией, состоящей из нескольких отрезков.

Характерно, что тарировочная кривая не проходит через начало координат, а пересекает вертикальную ось несколько выше его. Это вполне понятно, так как трение в подшипниках, червячной пере-

даче и контактном механизме не позволяет вертушке вращаться при очень малых скоростях. Нужно достигнуть некоторой скорости (различной для разных вертушек), чтобы силы трения были преодолены и вертушка начала вращаться. Эта минимальная *начальная скорость* v, которую улавливает вертушка, называется *чувствительностью* ее. На рис. 119 она представляет отрезок на оси ординат, отсекаемой кривой, и равна $v_0 = 0{,}055$ *м/сек.*, т. е. данная вертушка начинает вращаться только при скоростях около 6 *см/сек.* Чувствительность разных вертушек колеблется в широких пределах, обычно от 5 до 15 *см/сек.*, причем надо иметь в виду, что скорости, измеренные около этой величины, могут иметь значительную относительную погрешность, так же, как и число оборотов при тарировке.

Вообще говоря, точки в верхней части тарировочной кривой не располагаются строго по прямой линии. Отклонения могут иметь причиной неточность измерений, но, кроме того, и другие обстоятельства. Так, исследования *Эпера* на Бернской тарировочной станции показали, что при больших скоростях могут получаться некоторые отклонения от прямой, связанные, вероятно, с образованием водоворотов вокруг лопастей и движением и интерференцией волн на поверхности канала. Точно также при очень малых скоростях отклонения от плавной кривой в самом ее начале могут объясняться влиянием инерции крыльев при переходе их из состояния покоя в движение. Для практики эти отклонения несущественны, и тарировочная кривая проводится так, чтобы занять среднее, наиболее вероятное положение.

Если вертушка тарировалась в менее точных условиях, например в полевой обстановке, то точки разбрасываются, образуя полосу большей или меньшей ширины. Для внесения определенности в проведение кривой, можно разбить их на отдельные группы, например через определенные интервалы скоростей или чисел оборотов, и каждую группу заменить одной точкой, расположенной в ее центре тяжести. Координаты последнего определяются как арифметическое среднее из координат отдельных точек. Через центры тяжести и проводится тарировочная кривая.

Аналитическое выражение зависимости между скоростью v и секундным числом оборотов n, как уже указывалось в § 25, при идеальных условиях имело бы вид (71):

$$v = k \cdot n,$$

где k есть шаг винтовых лопастей или соответствующая средняя величина подъема для плоских или иначе искривленных крыльев (условная величина для чашечных вертушек). Это есть уравнение прямой, проходящей через начало координат, но мы уже видели, что тарировочная кривая при $n = 0$ дает значение v всегда больше нуля. Этой формой уравнения, как будет показано ниже, можно пользоваться с успехом для прямолинейного участка тарировочной кривой при скоростях выше определенного предела.

Предполагая, что тарировочная кривая есть прямая линия, отсекающая на оси v отрезок v_0, можно придать ее уравнению вид:

$$v = v_0 + kn, \qquad (76)$$

носящий название уравнения *Вольтмана*. И это уравнение дает не совсем удовлетворительные результаты при малых скоростях, хотя для некоторых вертушек оно оказывается практически вполне пригодным и широко применяется.

Более универсальными и точными являются уравнения кривых второго порядка, в частности уравнения гиперболы в виде, данном *Баумгартеном* (1847 г.):

$$v = pn + \sqrt{q^2n^2 + v_0^2}. \qquad (77)$$

Последнее уравнение особенно широко используется в европейской практике. *Шмидт* его преобразовал и представил в виде:

$$v = (1-\beta)kn + \sqrt{(\beta kn)^2 + v_0^2}. \qquad (78)$$

Этому уравнению соответствует *гипербола*, асимптота которой $v = kn$ проходит через начало координат (рис. 120). Оно имеет три постоянных коэфициента β, k и v_0, причем коэфициент β колеблется в пределах от нуля до единицы. Предыдущие уравнения прямой линии являются его частными случаями; так, при $v_0 = 0$, $v = kn$, а при $\beta = 0$, $v = v_0 + kn$; при $\beta = 1$ получаем

$$v = \sqrt{k^2n^2 + v_0^2}.$$

Как видно из рис. 120,

$$v_0 = OA, \quad k = \operatorname{tg}\alpha.$$

Коэфициент β *Шмидт* ставит в зависимость от v_0 и дает для него приближенную эмпирическую формулу:

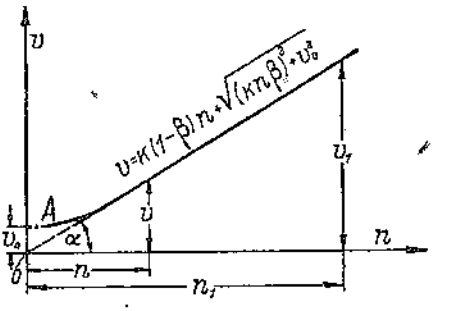


Рис. 120. Тарировочная кривая по Шмидту.

$$\beta = -0{,}115 + 9{,}2\, v_0, \qquad (79)$$

которая применима лишь в пределах

$$0{,}0125 < v_0 < 0{,}121 \ м/сек.$$

(для крайних значений β).

Отт исходит из следующих соображений. Действующий на лопасти вертушки вращающий момент пропорционален скорости течения v и разности $(v - kn)$:

$$M = Av\,(v - kn).$$

Сопротивления складываются из гидравлических и механических. Первые обусловливаются трением воды о лопасти, вихреобразованием и подпором, создаваемым телом вертушки и удерживающими ее приспособлениями, и пропорциональны в основном второй, а отчасти первой степени скорости. Их момент

$$R_h = v \sum B + v^2 \sum C.$$

Вторые вызываются трением в подшипниках, червячной передаче и контактах и, согласно опытам *Отта*, могут быть представлены в виде

$$R_m = \frac{v}{v - a' - k'n}.$$

Из условия равенства моментов вращающего и сопротивлений, после некоторых преобразований *Отт* приходит к универсальному уравнению тарировочной кривой вертушки (гиперболы) в таком виде:

$$v = \frac{a + a'}{2} + \frac{k + k'}{2}\, n + \sqrt{\left(\frac{a - a'}{2} + \frac{k - k'}{2}\, n\right)^2 + c^2}, \qquad (80)$$

которое может быть представлено несколько проще двумя приближенными, но достаточно точными уравнениями:
при

$$n < \frac{a' - a}{k - k'},\quad v = a' + k'n + \frac{c^2}{c - (a - a') - (k - k')\,n}, \tag{81}$$

при

$$n > \frac{a' - a}{k - k'},\quad v = a + kn + \frac{c^2}{c + (a - a') + (k - k')\,n}. \tag{82}$$

Здесь имеются пять независящих друг от друга постоянных коэфициентов: a, a', k, k' и c.

Эта гипербола имеет две асимптоты (рис. 121):

$$v = a + kn \quad \text{и} \quad v = a' + k'n$$

и дает в качестве частных случаев все приведенные выше уравнения прямых линий и гипербол и еще некоторые другие (уравнения *Рато*, *Гюмбеля*, *Кри*).

§ 34. Определение коэфициентов уравнений тарировочных кривых.

1) Уравнения прямой линии.

Уравнение (71) $v = kn$ часто применяется к вертушкам *Прайса*, выпускаемым американской фирмой *Герлей*, и к другим вертушкам (например, *Отта*) при скоростях больше известного предела (обычно при $v > 0{,}5$ *м/сек*) Наиболее вероятное значение коэфициента k получается из системы уравнений при подстановке в (71) значений v и n для каждой поездки:

$$v_1 = kn_1$$
$$v_2 = kn_2$$
$$v_3 = kn_3 \quad \text{и т. д.,}$$

откуда

$$k = \frac{\Sigma v}{\Sigma n}.$$

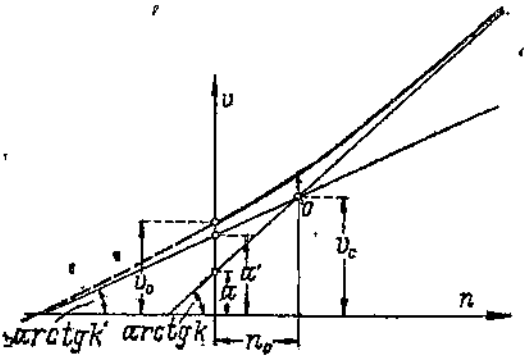


Рис. 121. Тарировочная кривая по Отту.

Например, для среднего типа вертушек *Прайса* (№ 617—623) фирма *Герлей* дает: $v = 0{,}6785\ n$ (в *м/сек.*).

Для вертушки *Отта* № 1904 (тип VI, тарировка 1912 г.), для крыльев № 1 при $n > 1{,}04$ ($v > 0{,}53$ *м/сек.*) $v = 0{,}507\ n$, для крыльев № 2 при $n > 1{,}1$ ($v > 0{,}58$ *м/сек.*) $v = 0{,}525\ n$.

Для определения коэфициентов v_0 и k уравнения (76) $v = v_0 + kn$ можно применить несколько способов.

а) Выбирая 4 хорошо укладывающиеся и определяющие среднее положение прямой на чертеже точки с координатами v_i и n_i, можно написать четыре уравнения вида (76). Складывая их попарно, получим

$$v_1 + v_2 = 2v_0 + k\,(n_1 + n_2),$$
$$v_3 + v_4 = 2v_0 + k\,(n_3 + n_4).$$

Отсюда, вычитая из первой суммы вторую, находим

$$k = \frac{(v_1 + v_2) - (v_3 + v_4)}{(n_1 + n_2) - (n_3 + n_4)}, \tag{83}$$

а исключая k, имеем

$$v_0 = \frac{(n_1 + n_2)(v_3 + v_4) - (n_3 + n_4)(v_1 + v_2)}{2[(n_1 + n_2) - (n_3 + n_4)]}. \tag{84}$$

Если тарировочная кривая разбивается на 2 отрезка прямых, то для каждого можно таким образом найти коэфициенты уравнения, а также точку пересечения

прямых, определяющую границы применения обоих уравнений. Этот способ определения коэфициентов применяется Австрийским гидрографическим Бюро.

б) В Швейцарии тарировочную кривую заменяют ломаной линией из 2—3—4 прямолинейных отрезков и для каждого вычисляют коэфициенты уравнения (76). Более упрощенно вычисления делаются на Волжской тарировочной станции, где в пределах каждого такого участка тарировочной кривой точки делятся на две численно равные группы. Для каждой из групп вычисляются средние арифметические значения v и n, и по ним из двух уравнений находятся коэфициенты v_0 и k.

в) Более точно эти коэфициенты могут быть определены по *способу наименьших квадратов*.

Уравнение (76) может быть переписано так:

$$v - kn - v_0 = 0.$$

Оно справедливо лишь для точек, точно ложащихся на прямую линию. Действительные, полученные тарировкой точки вообще отклоняются от последней, и для них величина отклонения составляет:

$$v - kn - v_0 = \delta.$$

Сумма квадратов отклонений всех точек равна:

$$\Sigma\delta^2 = \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \ldots + \delta^2{}_m =$$
$$= (v_1 - kn_1 - v_{01})^2 + (v_2 - kn_2 - v_{02})^2 + \ldots + (v_m - kn_m - v_{0m})^2.$$

Для того, чтобы она была наименьшей, необходимо приравнять ее производные по k и v_0 нулю:

$$d\frac{\Sigma\delta^2}{dk} = -2n_1(v_1 - kn_1 - v_{01}) - 2n_2(v_2 - kn_2 - v_{02}) - \ldots - 2n_m \times$$
$$\times (v_m - kn_m - v_{0m}) = 0;$$

$$d\frac{\Sigma\delta^2}{dv_0} = -2(v_1 - kn_1 - v_{01}) - 2(v_2 - kn_2 - v_{02}) - \ldots - 2(v_m - kn_m - v_{0m}) = 0.$$

Эти равенства могут быть переписаны таким образом:

$$k\sum(n^2) + v_0\sum n - \sum(nv) = 0$$
$$k\sum n + mv_0 - \sum v = 0.$$

Решая последние 2 уравнения совместно, можно определить значения k и v_0:

$$k = \frac{m\cdot\Sigma(nv) - \Sigma v\cdot\Sigma n}{m\cdot\Sigma(n^2) - (\Sigma n)^2} \qquad (85)$$

$$v_0 = \frac{\Sigma v\cdot\Sigma(n^2) - \Sigma(nv)\cdot\Sigma n}{m\cdot\Sigma(n^2) - (\Sigma n)^2}. \qquad (86)$$

Например, при тарировке вертушки системы *Фтили* получены следующие данные (скорости в *фут/сек*):

Номер поездки	n	v	n^2	nv
1	1,579	1,552	2,493	2,451
2	2,146	2,132	4,605	4,575
3	2,502	2,472	6,200	6,185
4	2,707	2,670	7,328	7,228
5	2,802	2,762	7,851	7,739
6	3,390	3,370	11,492	11,424
7	4,530	4,440	20,521	20,113
8	4,700	4,700	22,090	22,090
9	4,920	4,870	24,206	23,960
Сумма	29,216	28,968	106,786	105,765

Из этой таблицы находим

$$k = \frac{9 \cdot 105{,}765 - 28{,}968 \cdot 29{,}216}{9 \cdot 106{,}786 - 29{,}216^2} = 0{,}982,$$

$$v_0 = \frac{28{,}968 \cdot 106{,}786 - 105{,}765 \cdot 29{,}216}{9 \cdot 106{,}786 - 29{,}216^2} = 0{,}032,$$

и уравнение тарировочной кривой (прямой):

$$v = 0{,}032 + 0{,}982n.$$

Форма уравнения (76) является, как уже указывалось, весьма подходящей для вертушек многих систем. Например, для вертушки *Отта* № 4613 (тип X) фирма дает: при испытании вертушки на штанге

$$v = 0{,}015 + 0{,}1285n,$$

при испытании на тросе:

$$v = 0{,}013 + 0{,}1301n$$

(*Отт* определяет значения коэфициентов несколько иными методами).

2) Уравнения кривых 2-го порядка.

Определение коэфициентов уравнений вида (77), (78) и (80) представляет более сложную задачу, решение которой по способу наименьших квадратов затрудни-

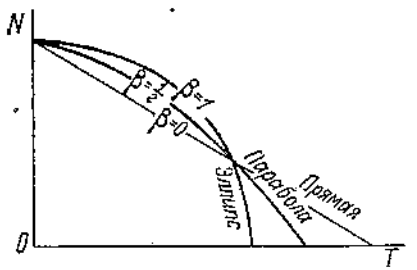


Рис. 122. Кривые $N = f(T)$ при разных значениях β.

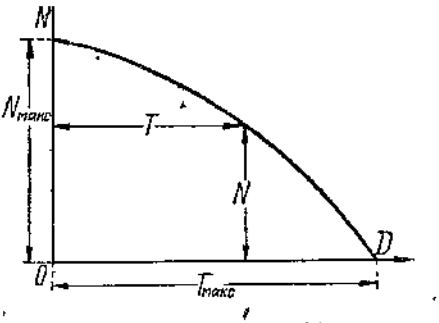


Рис. 123. Кривая $N = f(T)$.

тельно и громоздко. Поэтому с этой целью применяются различные другие приемы, обычно сводящиеся к построению добавочных, вспомогательных кривых.

Чаще предпочтение отдается уравнению *Баумгартена* в форме, предложенной *Шмидтом* (78):

$$v = (1 - \beta)\, kn + \sqrt{(\beta kn)^2 + v_0^2}.$$

Более точное [по сравнению с формулой (79)] определение коэфициента β производится при помощи построения особой кривой

$$N = f(T), \tag{87}$$

при постоянной длине L пути, проходимого вертушкой. Кривая эта показывает зависимость полного числа оборотов крыльев вертушки от времени пробега и имеет вид, изображенный на рис. 122. При $\beta = 0$ это прямая линия, при $\beta = 0{,}5$ — парабола, при $\beta = 1$ — эллипс. При других значениях β в пределах от 0 до 1 получаются кривые другого порядка. Изменяя форму кривой значениями β, *Шмидт* и пришел к уравнению вида (78).

Так как $v = \frac{L}{T}$; $v_0 = \frac{L}{T_{\max}}$; $n = \frac{N}{T}$ и $k = \operatorname{tg}\alpha$ (рис. 120)

или

$$k = \frac{v_{\max}}{n_{\max}} = \frac{L \cdot T_{\max}}{T_{\max} \cdot N_{\max}} = \frac{L}{N_{\max}} \quad \text{(рис. 123)}.$$

то, подставляя эти выражения в уравнение (78), получим:

$$\frac{L}{T}=(1-\beta)\frac{L}{N_{\max}}\cdot\frac{N}{T}+\sqrt{\left(\beta\frac{L}{N_{\max}}\cdot\frac{N}{T}\right)^2+\left(\frac{L}{T_{\max}}\right)^2},$$

или

$$1-(1-\beta)\frac{N}{N_{\max}}=\sqrt{\left(\beta\frac{N}{N_{\max}}\right)^2+\left(\frac{T}{T_{\max}}\right)^2},$$

откуда

$$\beta=\frac{\left(\frac{T}{T_{\max}}\right)^2-\left(1-\frac{N}{N_{\max}}\right)^2}{2\frac{N}{N_{\max}}\left(1-\frac{N}{N_{\max}}\right)}. \qquad (88)$$

Здесь N и T — координаты произвольно выбранной точки M. Этот способ определения β также не вполне точен, потому что по данным тарировки трудно надежно определить положение точки D и получить величину $T_{\max}$. Лучше найти последнюю вычислением, составляя 2 уравнения типа (88) по координатам двух произвольно взятых точек на кривой, совместным решением которых и определяется $T_{\max}$ и β.

Нередко для определения коэфициентов и контроля вычислений строится вспомогательная кривая, называемая *кривой Эпера*, для которой из тарировочных данных вычисляются числа оборотов M на единицу пути вертушки (на 1 *м*).

Ее общее выражение

$$M=\varphi(v), \qquad (89)$$

где

$$M=\frac{n}{v}, \qquad (90)$$

и она имеет вид, показанный на рис. 124.

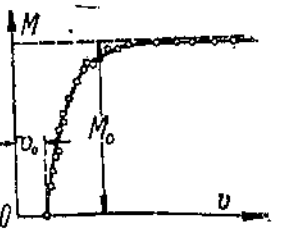


Рис. 124. Кривая Эпера.

При $M=0$ $(n=0)$ она дает на оси v отрезок, равный v_0; когда M достигает постоянной величины, равной M_0, то это значит, что соответствующая часть тарировочной кривой может быть заменена прямой линией $v=kn$, причем

$$k=\frac{1}{M_0}.$$

Считаясь со сложностью вычисления коэфициента β в уравнении *Шмидта*, некоторые тарировочные станции дают два уравнения вертушки: одно для больших скоростей, вида $v=kn$, другое — для малых, вида параболы или по *Шмидту* (78) причем часто берется среднее значение $\beta=0{,}5$ (кривая $N=f(T)$ — парабола).

Например, для вертушки *Отта* № 3618 (типа X) при испытании в г. Каунас (Литва) в 1927 г. получены уравнения:

при $n<6{,}14$ $(v<0{,}835$ *м/сек.*) —

$$v=0{,}0746\,n+\sqrt{0{,}0036\,n^2+0{,}0064};$$

при $n>6{,}14$ $(v>0{,}835$ *м/сек.*) —

$$v=0{,}1360\,n$$

(в первом уравнении $\beta=0{,}446$, $k=0{,}1346$, $v_0=0{,}08$).

Уравнение *Отта* (80) для вертушки № 3233 (рис. 119) имеет вид:

$$v=0{,}0307+0{,}1892n+\sqrt{(0{,}0735n-0{,}0187)^2+0{,}000237},$$

или в форме более удобной для практического применения, согласно уравнениям (81) и (82):

$$\text{при } n<0{,}255,\quad v=0{,}0495+0{,}1157\,n+\frac{0{,}0045}{1-2{,}78n},$$

$$\text{при } n>0{,}255,\quad v=0{,}0120+0{,}2627\,n+\frac{0{,}0107}{6{,}67\,n-1}$$

(значения коэфициентов таковы: $a = 0{,}0120$, $a' = 0{,}0495$, $k = 0{,}2627$, $k' = 0{,}1157$, $c = 0{,}00154$).

§ 35. Пользование тарировочными кривыми и уравнениями. При пользовании тарировочными кривыми и уравнениями необходимо иметь в виду:

1) для каких крыльев дана зависимость (так как у некоторых вертушек имеется набор сменных крыльев разного шага) и для какого способа опускания — на штанге или на тросе,

2) в каких границах применимо то или иное уравнение вертушки,

3) не устарела ли тарировка, так как с течением времени могут измениться положение кривой и коэфициенты уравнений.

Пользоваться тарировочными данными удобно двояким образом: или при помощи кривой, вычерченной в достаточно крупном масштабе, или при помощи таблицы, составленной на основании кривой или уравнения вертушки.

Обычно тарировочная кривая прилагается к вертушке, если же имеется только уравнение, то по нему нетрудно построить кривую на миллиметровой бумаге, вычислив для нескольких точек значения v по заданным n. Для проведения кривой при малых скоростях нужно вычислить значения v через более мелкие промежутки n, так как в этой части кривая может сильно отклоняться от прямой.

Иногда уравнение вертушки дается не в виде (62): $v = f(n)$, а в виде:

$$v = f(t), \tag{91}$$

где t есть промежуток времени между двумя соседними звонками. Такая кривая представляет гиперболу, имеющую асимптотами оси v и t, и для непосредственного пользования неудобна, так как скорости еще ее средней части определяются весьма неточно. Лучше ее привести к обычному виду, для чего в уравнение надо подставить вместо t его выражение через n. Если звонки даются через 25 оборотов крыльев, то $t = \frac{25}{n}$, если через 50 оборотов, то $t = \frac{50}{n}$ и т. д.

Таблица может быть составлена с любой степенью подробности, через произвольные интервалы n, например через 0,1; 0,05; 0,02 оборота крыльев. Иногда такая таблица прилагается к вертушке.

Например, для вертушки *Отта* № 1399 таблица может выглядеть таким образом:

Число оборот. в сек.	Скорость в *м/сек.*									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,068	0,080	0,095	0,113	0,133	0,154	0,174	0,196	0,219	0,242
1	0,264	0,286	0,310	0,334	0,357	0,380	0,403	0,427	0,451	0,475
2	0,500	0,524	0,548	0,572	0,597	0,621	0,645	0,669	0,693	0,717
3	0,742	0,767	0,791	и	т.	д.				

По этой таблице имеем:

при $n = 1{,}2$ $v = 0{,}310$
„ $n = 3{,}15$ $v = 0{,}779$
„ $n = 1{,}81$ $v = 0{,}453$
и т. д.

При всяких исследованиях, претендующих на большую точность, особенно необходимо, чтобы вертушка была протарирована в точно таких же условиях, в каких производится работа. Это может быть очень существенным, например, при измерениях в весьма мутной воде или при низкой температуре.

Коэфициенты уравнения вертушки с течением времени могут значительно меняться, что приводит к необходимости периодических повторных тарировок, о чем уже упоминалось выше. Например, для вертушки *Прайса* № 1067 тарировочные уравнения оказались:

в марте 1914 г.: $v = 0{,}012 + 0{,}680\ n$ (*м/сек*),
в июне 1918 г.: $v = 0{,}040 + 0{,}707\ n$,
в июне 1923 г.: $v = 0{,}018 + 0{,}655\ n$,

несмотря на то, что вертушка работала не больше 12 раз в году. Такое изменение коэфициентов особенно сильно должно было отразиться на результатах измерения малых скоростей, приводя к значительным ошибкам.

§ 36. Методы измерения скоростей вертушкой. Из предыдущего в основном уже ясна сущность измерения скоростей вертушкой. Погружение вертушки на разные глубины при помощи штанги или троса делает наиболее удобным измерение скоростей на *отдельных вертикалях*. Раз установивши прибор в определенном месте по ширине реки, выгоднее сделать им сразу несколько измерений на различных глубинах, чем устанавливать его в большом числе мест. Кроме того, распределение скоростей по вертикали исследовано лучше, чем по другим направлениям, и для определения средней скорости на вертикали существует ряд практически проверенных формул. Наконец, при этом методе удобно производится вычисление расхода потока.

При работе вертушкой на отдельных вертикалях применяются два основных метода измерения скоростей:

1) *в отдельных точках* и
2) *интеграционный метод.*

Как тот, так и другой метод имеют некоторые разновидности. Так, первый метод подразделяется на:

а) *многоточечный* или *основной*, дающий возможность построения графиков распределения скоростей по вертикалям, и

б) *приближенные* методы, когда скорости измеряются в одной, двух или трех точках вертикали и средняя скорость может быть определена по одной из приближенных формул без построения эпюр.

Чаще всего при многоточечном методе точки располагаются через 0,2 полной глубины вертикали H, в частности у нас (в СССР) принято измерять скорости в следующих 5 точках:

1) у поверхности (на глубине одного или полутора радиусов крыльев вертушки);
2) на глубине 0,2 H;
3) » » 0,6 H;
4) » » 0,8 H;
5) у дна (насколько это позволяет конструкция вертушки).

Скорость на глубине 0,4 H обычно не измеряется, так как эпюра скоростей между 0,2 H и 0,6 H имеет сравнительно малую кривизну, которая определяется выше- и нижележащими точками. Кроме того,

большинство приближенных формул, которые могут проверяться эпюрой, не включает скорости на 0,4 глубины.

Иногда вертикальное расстояние между точками 1 и 5 (у поверхности и у дна) делится на равное число частей (не менее 4 — в Швейцарии) или точки берутся через определенное абсолютное расстояние или через 0,1 глубины (в США). В других случаях точки располагаются более тесно у дна и у поверхности (в Венгрии) или только у дна.

Сгущенное расположение точек у дна и у поверхности следует считать наиболее целесообразным при измерениях под ледяным покровом. К этому же типу подходит распределение точек, принимаемое у нас, так как расстояния между точками 1—2 и 4—5 получаются всегда меньше, чем 0,2 H.

Порядок измерения скоростей в отдельных точках, вообще говоря, безразличен. Однако при размываемом дне и упорной штанге рекомендуется начинать измерения снизу, так как от продолжительного пребывания штанги в одном месте вокруг нее может образоваться размыв, который отразится на распределении скоростей вообще и донных в частности.

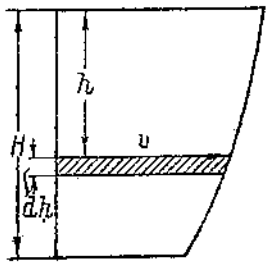


Рис. 125. Схема к интеграционному методу.

Многоточечный метод, сопровождаемый построением эпюр, дает возможность наиболее полно осветить распределение скоростей и найти точную величину средней скорости. Недостатком его является лишь большая продолжительность измерений, удорожающая работы, при которой могут также произойти заметные изменения высоты уровня воды, отражающиеся на величине скоростей и их распределении.

Приближенные методы, опирающиеся на эмпирические формулы (§ 19), не требуют особых пояснений. Трех-, двух- и одноточечный способы дают возможность значительно быстрее определить среднюю скорость вертикали как по причине меньшего количества измерений, так и ввиду отсутствия необходимости построения эпюр и их обработки. Однако, давая меньшую точность и не освещая картины распределения скоростей, они могут оказаться неприменимыми в ненормальных или неизученных условиях.

Интеграционный метод, как и приближенные методы, имеет основной целью сокращение продолжительности наблюдений. Его впервые применил в 1850 г. *Тревиран* для измерения расхода воды в канале, передвигая вертушку на одной глубине по всей ширине канала; средняя скорость, показанная вертушкой, принималась за среднюю по горизонтали. Затем такой же способ для измерения средней скорости по вертикали был применен *Реви* в Ю. Америке спустя 20 лет и позже подробно разработан *Гарльжером* при работах на Эльбе и Дунае.

Для плавного перемещения по штанге вертушки последняя опускается и поднимается при помощи барабана, снабженного *регулятором* вращения (*b* на рис. 100). Вертушка должна иметь донный контакт и сигнализацию через каждый оборот крыльев, отмечаемый телефоном или электрическим счетчиком оборотов.

Пусть вертушка поднимается или опускается по вертикали (рис. 125) глубиной H с постоянной скоростью $a = \frac{H}{T}$, где T есть полное время, за которое она проходит путь AB, причем соответствующее число оборотов крыльев равно N.

Площадь эпюры: $\Omega_v = \int_0^H v dh$.

Если тарировочная кривая вертушки имеет вид прямой линии и выражается уравнением (76):

$$v = v_0 + kn,$$

то

$$\Omega_v = \int_0^H (v_0 + kn)\, dh = Hv_0 + \int_0^H kn dh.$$

Но

$$dh = a \cdot dt = \frac{H}{T}\, dt,$$

поэтому

$$\Omega_v = Hv_0 + k\, \frac{H}{T} \int_0^T n dt,$$

или, замечая, что ndt есть число оборотов за промежуток времени dt, а $\int_0^T ndt = N$, имеем:

$$\Omega_v = Hv_0 + Hk\, \frac{N}{T},$$

откуда средняя скорость на вертикали

$$v_v = \frac{\Omega_v}{H} = v_0 + k\, \frac{N}{T}. \qquad (92)$$

Следовательно, если тарировочная линия вертушки — прямая (хотя бы только в пределах измеряемых скоростей по вертикали), то среднюю скорость можно определить одним измерением по среднему секундному числу оборотов $\frac{N}{T}$.

Результат получается менее точный, чем в основном (многоточечном) методе, так как конструкция вертушки не позволяет приблизить ось вращения до самого дна, равно как и до самой поверхности воды, хотя в последнем случае ось вертушки без заметного влияния на результаты может быть поднята до поверхности. Вследствие того, что не учитываются скорости у дна, средняя скорость получается несколько преувеличенной.

Гарлахер на основании 200 наблюдений нашел значения поправочного коэфициента Z, на который нужно умножить полученную среднюю скорость, чтобы получить истинную, ставя его в зависимость от глубины вертикали H и расстояния от оси вертушки до дна c:

H м	Z при $c = 0{,}2$ м	Z при $c = 0{,}15$ м
0,5	0,86	0,89
1,0	0,92	0,94
2,0	0,96	0,97
3,0	0,98	0,98
5,0	0,98	0,99
8,0	0,99	0,99

Кроме того, на результате сказывается инерция вращения крыльев вертушки, передвигающейся через слои, в которых скорость течения постепенно убывает или возрастает, благодаря чему при опускании вертушки скорость получается преувеличенной, а при подъеме преуменьшенной. Для устранения этого обстоятельства рекомендуется последовательное опускание и поднимание вертушки, а также возможно медленное и равномерное ее передвижение. Обычно скорость передвижения вертушки составляет около 1 *м* в минуту (около 1,5 *см* в секунду). Наконец, при этом методе не вполне исключается пульсация, не говоря уже о невозможности получения эпюр распределения скоростей по вертикали.

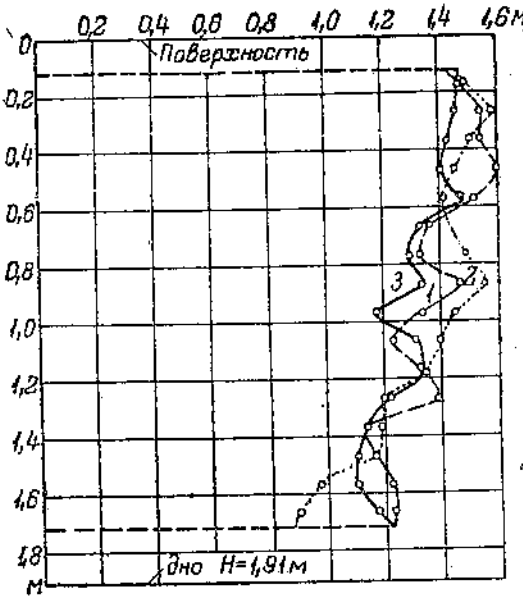


Рис. 126. Кривые распределения скоростей, полученные интеграционным методом.

По исследованиям *Гарлахера* точность интеграционного метода в среднем на 1—3% ниже, чем основного. Применяться он может и для штанговых и для тросовых вертушек, но лишь с горизонтальной осью вращения, так как вертушки на вертикальной оси (чашечные) при вертикальном перемещении стремятся вращаться в обратную сторону.

Видоизменением интеграционного метода является так называемый *«детальный»* метод, предложенный *Гайошем* в 1898 г. и отличающийся от описанного лишь тем, что работа вертушки во время ее опускания или подъема записывается хронографом. Последний отмечает на бумажной ленте секунды и каждый оборот крыльев вертушки, причем вал, передвигающий ленту, пускается одновременно с барабаном, служащим для подъема и опускания вертушки, так что расстояние, пройденное вертушкой, пропорционально длине ленты. Лента разбивается на ряд участков равной длины, для каждого из которых определяется средняя скорость, затем строится график распределения скоростей по вертикали, причем полученные скорости откладываются против середины каждого участка. Вследствие небольшой продолжительности измерения пульсация заметно отражается на очертаниях графика, который оказывается непригодным для исследования законов распределения скоростей по вертикали или построения изотах.

На рис. 126 показаны три полученных таким образом последовательно кривых, дающие наглядное представление о влиянии пульсации. При определении средней скорости вертикали, отклонения отдельных точек, вызванные пульсацией, в значительной мере компенсируются, и точность детального метода приближается к основному.

Так, для кривых, изображенных на рис. 126 и полученных нами в 1915 г. на р. Сыр-Дарье (ст. Запорожская), в пределах глубин 0,17—1,67 *м* средние скорости получаются: $v_1 = 1{,}369$, $v_2 = 1{,}353$, $v_3 = 1{,}293$ *м/сек*. Средняя скорость по основному методу (при плавной кривой, проведенной по точкам измерений через $0{,}1H$) для тех же пределов глубин $v_0 = 1{,}327$ *м/сек*. (для полной глубины $v_0 = 1{,}366$ *м/сек*). Для получения этих кривых хронографом отмечались не только секунды и обороты крыльев вертушки, но (третьим пером) и проходимый ею путь через 2 *см* (запись наподобие изображенной на рис. 118).

Главный недостаток этого метода — сложность приспособлений, необходимых для работ.

§ 37. Продолжительность измерений в отдельных точках. Необходимая продолжительность работы вертушки при измерении скоростей в отдельных точках зависит главным образом от пульсации. Последняя, как известно, представляет чрезвычайно сложное явление, законы которого мало выяснены до сих пор. Известно, что в поперечном сечении потока пульсация усиливается от поверхности к дну и

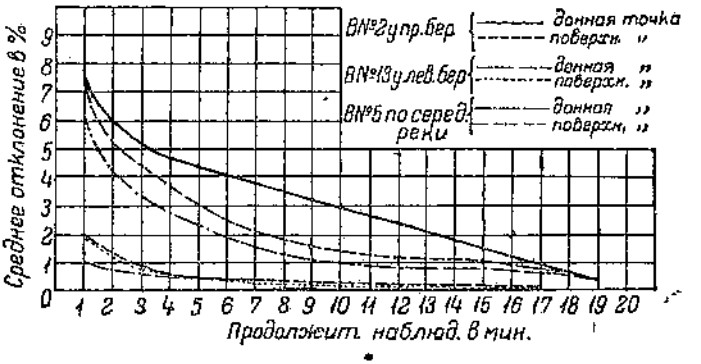


Рис. 127. Ошибки определения скоростей при разной продолжительности наблюдений на р. Зее.

от стержня к берегам, находясь, таким образом, в обратной зависимости от величины скорости. Измеряемая вертушкой скорость, средняя за некоторый промежуток времени, тем ближе к истинной величине осредненной местной скорости, чем дольше производится измерение (при установившемся движении).

Чтобы установить ту минимальную продолжительность измерения, при которой может быть достигнут достаточно точный результат, предпринимались неоднократные исследования. Измеряя скорости в отдельных точках вертушкой при помощи хронографа за достаточно длительные промежутки времени (10, 20 минут, час) и комбинируя полученный материал, можно сравнивать результаты наблюдений разной длительности, определяя их точность. Такие работы производились русскими инженерами (*Соколов, Мусселиус, Моисеенко, Москвитинов* и *Гиршлович* и др.) и приводят к интересным графикам, дающим зависимость между средней ошибкой измеряемой скорости и продолжительностью измерения.

На рис. 127 показаны такие графики, полученные *Мусселиусом* на р. Зее (у Инаранды) в 1909 г. для трех вертикалей при 20-минутных наблюдениях (глубина вертикалей: № 2 — 2,14 *м*, № 13 — 2,10 *м*, № 5 — 4,2 *м*). Сильно поднятое положение верхней кривой, соответствующей донной точке вертикали № 2, объясняется, повидимому, влиянием очень каменистого дна.

На рис. 128 приведены кривые, полученные нами на р. Сыр-Дарье (ст. Заморозская) в 1915 г. из часовых наблюдений на вертикали около середины реки (см. также рис. 41) при средней скорости на вертикали 1,358 *м/сек.* Скорости того же порядка мы имеем для кривых рис. 127 (вертикали № 2 и № 5).

Среднюю ошибку значительно превосходят отдельные отклонения, достигавшие, например, на р. Зее для точек у поверхности 21% и у дна 87% (за 1 сек). При работах на р. Сыр-Дарье максимальные отклонения составляли для точек у поверхности 10% и у дна 23% (при 20-секундном наблюдении).

Графики отчетливо обнаруживают усиление пульсации по мере приближения вертушки к дну и необходимость для получения равноточных измерений более продолжительных наблюдений у дна, чем у поверхности. *Мусселиус* на основании своих исследований предложил для получения 2% точности вести наблюдения около поверхности (на 0,2 *H*) 2 минуты, у дна (на 0,8 *H*) 8 минут, *Моисеенко* для соответственных точек — 2—3 минуты и 5—6 минут, а под ледяным покровом для всех точек — от 3 до 6 минут.

Надо иметь в виду, что средняя ошибка зависит не только от пульсации, связанной со степенью турбулентности потока, но также от неравномерного вращения

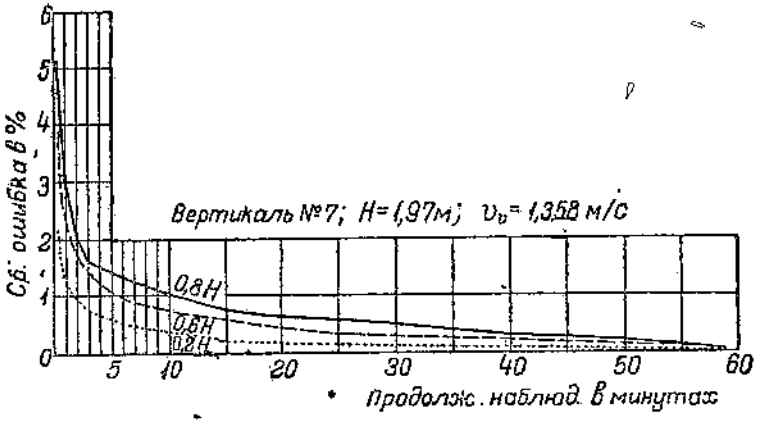


Рис. 128. Ошибки определения скоростей при разной продолжительности наблюдений на р. Сыр-Дарье.

крыльев вертушки, их формы и других причин, поэтому вряд ли возможно из полученных результатов делать общие выводы.

Инструкцией *Управления водных путей* (1914 г.) устанавливались следующие минимальные нормы продолжительности наблюдений в отдельных точках:

1)	у поверхности	3 минуты
2)	на глубине 0,2*H*	3 „
3)	„ „ 0,6*H*	5 „
4)	„ „ 0,8*H*	8 „
5)	у дна	8 „

При ледяном покрове — у поверхности и на 0,2*H* — 8 минут, в остальных точках — без изменения.

Инструкция *Гидрометрической части Отдела земельных улучшений* (1915 г.) предлагала измерять скорости при трехточечном методе:

1)	на глубине 0,2*H*	не менее	2	минут,
2)	„ „ 0,6*H*	„ „	3	„
3)	„ „ 0,8*H*	„ „	4	„

и вообще не более 8 минут, причем число оборотов крыльев вертушки должно быть не менее 100 и не больше 500. При ледяном покрове продолжительность наблюдения в точке 0,2*H* должна быть такая же, как на 0,8*H*.

Современные инструкции *НКЗ РСФСР* (1930 г.) и *Гидроэлектропроекта* (1914 г.) рекомендуют эти же нормы минимальной продолжительности, добавляя к ним для точек у поверхности продолжительность не менее 2 минут и у дна — не менее 5 минут.

Надо заметить, что при очень малых глубинах точки у поверхности и на $0{,}2H$, так же как и у дна и на $0{,}8H$, часто оказываются настолько близкими, что их приходится заменять одной точкой.

Инструкция *НКЗ УССР* (1925 г.) ограничивает число оборотов лопастей вертушки 100 и 300 оборотами и продолжительность наблюдений:

1) на глубине $0{,}2H$ от 2 до 5 минут,
2) „ „ $0{,}6H$ „ 3 „ 6 „
3) „ „ $0{,}8H$ „ 4 „ 8 „

(на $0{,}2H$ при ледяном покрове от 4 до 8 минут).

Инструкция *ЕГМС* (1935 г.) рекомендует нормальную продолжительность наблюдений у поверхности и на $0{,}2H$—2 минуты, на $0{,}6H$ — 3 минуты и на $0{,}8H$ и у дна — 4 минуты; при наличии льда у поверхности и у дна—6 минут и на промежуточных точках —4 минуты.

Инструкция *Среднеазиатского института водного хозяйства* (1930 г.) устанавливает минимальную продолжительность для всех точек в 2 минуты. При этом измерение скорости в каждой точке, продолжаясь непрерывно, разбивается на интервалы с равным числом оборотов, продолжительностью не меньше 30 сек. каждый. Число интервалов должно быть не меньше четырех. Если продолжительность двух первых интервалов отличается от двух последних более, чем на 5%, то измерение продолжается еще на 2 интервала и сравниваются 3 первых и 3 вторых интервала и т. д. — до тех пор, пока расходимость не будет меньше 5%. Рекомендуемый этой инструкцией порядок наблюдений можно считать наиболее целесообразным.

Например, вертушка дает звонок через 25 оборотов. Число оборотов в интервале 75 (3 звонка, так как продолжительность 50 оборотов меньше 30 секунд). Отсчеты по секундомеру:

1) 41,0 (75 оборотов)
2) 82,8 (150 „)
3) 129,4 (225 „)
4) 174,0 (300 „)

Продолжительность двух последних интервалов: $174{,}0 - 82{,}8 = 91{,}2$, а первых: 82,8. Разница $91{,}2 - 82{,}8 = 8{,}4$, что составляет около 10% от 82,8. Наблюдения продолжаются еще на 2 интервала:

5) 216,4 (375 оборотов)
6) 259,7 (450 „)

$259{,}7 - 129{,}4 = 130{,}3$; $130{,}3 - 129{,}4 = 0{,}9$ (около 1%), и измерение можно прекратить.

Такой же в общем способ контроля работы вертушки устанавливается всеми инструкциями.

Прежде чем пускать в ход секундомер, когда вертушка установлена на требуемую глубину, обычно пропускают 1—2 звонка, чтобы крылья приобрели скорость вращения, соответствующую скорости течения. Секундомер пускается и отсчеты по нему делаются или в начале, или в конце каждого звонка.

При работе со счетчиком оборотов интервалы могут намечаться и

не по числу оборотов, а по числу секунд, например через 50, 100 секунд; тогда сравниваются между собой числа оборотов.

В западно-европейской практике принята в общем меньшая продолжительность наблюдений, основанная на том, что при большом числе измерений в различных точках поперечного сечения ошибки в отдельных измерениях, вызванные пульсацией, в значительной мере взаимно компенсируются (как в детальном методе). Так, *Швейцарское гидрометрическое бюро* принимает 2—2½ минуты, *Венское гидрографическое бюро* —1 минуту и только при неспокойном течении 3 и более минут. У американцев продолжительность наблюдений также невелика — около 1 минуты и редко больше. При быстрых изменениях высоты уровня малая продолжительность измерений в отдельных точках вполне целесообразна.

Помимо пульсации, на продолжительность измерений могут влиять и другие обстоятельства. Так, в очень мутной воде приходится сокращать время наблюдений во избежание засорения вертушки;

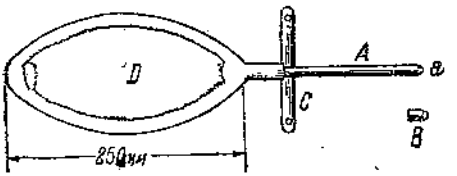


Рис. 129. Батометр-тахиметр.

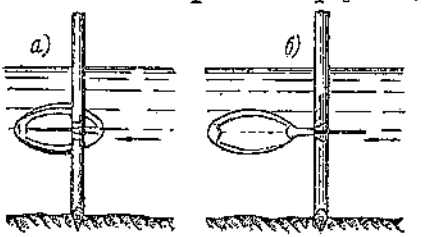


Рис. 130. Установка батометра-тахиметра.

наличие в воде растений вызывает задержки и остановки вертушки, проходящие суда создают волнение и нарушают нормальное распределение скоростей и т. д.

§ 38. Батометр-тахиметр. Батометрами, как уже указывалось в § 20, называются приборы, служащие для взятия небольших объемов (проб) воды с разных глубин, хотя в точном переводе слово «батометр» обозначает «глубиномер». Основная область применения батометров в речной гидрометрии — учет наносов, переносимых текучей водой, связанный с анализом получаемых проб (гл. V). Складной «*батометр-тахиметр*» получил у нас особенно широкое распространение в период временного недостатка в вертушках (после мировой и гражданской войн), как чрезвычайно простой в обращении и недорогой прибор, хотя и значительно менее точный и надежный, чем вертушка, но дающий в надлежащих условиях применения удовлетворительные результаты.

Батометр-тахиметр (рис. 129) представляет плоско складывающийся резиновый баллон *D* с присоединенной к нему металлической трубкой *A*, оканчивающейся заостренным носиком *a*. Внутренний диаметр трубки около 6 *мм*. Для измерения больших скоростей, чтобы баллон не наполнялся слишком быстро, на трубку *A* надевается наконечник *B*, имеющий отверстие диаметром 3 *мм*. Стержень *C* с дырочками на концах, соединенный с трубкой *A* под прямым углом, служит для привязывания батометра к деревянному шесту-штанге. Полная емкость баллона около 1200 *см*^{3}.

Батометр привязывается проволокой или бечевкой к штанге так, чтобы его трубка была перпендикулярна к штанге. Можно также просверлить в деревянной штанге отверстия, в которые закладывается трубка, или устроить особый держатель, позволяющий передвигать батометр по штанге и укреплять его на любой высоте. Перед опусканием прибора в воду из баллона выжиманием удаляется воздух, а при опускании носок направляется вдоль по течению, будучи пригнут к баллону (рис. 130-*а*). Затем, одновременно с пуском секундомера, штанга быстро поворачивается вокруг своей оси на 180° и носок направляется навстречу течению (рис. 130-*б*). При этом удобно над поверхностью воды иметь прикрепленный к штанге визир или указатель, по которому можно следить за правильной установкой прибора.

Вода постепенно наполняет баллон. Прежде, чем он наполнится на ¾ (900 *см*³), штанга опять поворачивается в начальное положение и секундомер останавливается. Затем батометр вместе со штангой в таком положении осторожно вынимается и измеряется натекший в него объем воды W при помощи градуированного стакана (мензурки) или путем взвешивания на весах (1 *см*³ воды весит 1 *г*). Делением объема натекшей воды W на время T, определенное по секундомеру, находится секундный приток воды в батометр $q = \frac{W}{T}$, а по нему из тарировочной кривой или уравнения батометра — скорость v.

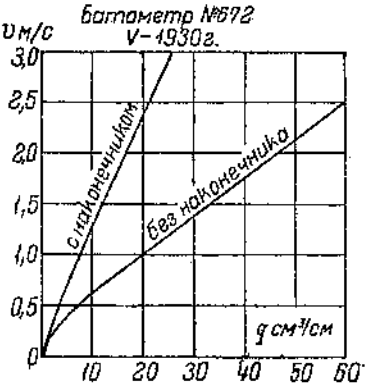


Рис. 131. Тарировочные кривые батометра-тахиметра.

Эту последнюю нельзя просто определить по входному сечению отверстия ω (как $\frac{q}{\omega}$), так как скорость воды в трубке не равна скорости течения. Батометры тарируются точно так же, как и вертушки — в тарировочных бассейнах, с той лишь разницей, что вместо секундного числа оборотов крыльев при тарировке определяется секундный приток воды в батометр q.

Тарировочная кривая батометра (рис. 131) имеет вид прямой линии при величинах притока $q > 2$—3 *см*³/*сек.* и криволинейный участок в самом начале при меньших значениях q. Поэтому уравнение батометра для прямолинейного участка имеет обычный вид:

$$v = \alpha + \beta q. \qquad (93)$$

Так как каждый батометр снабжен добавочным наконечником для измерения больших скоростей, то и тарировочных кривых должно быть две.

Для получения хороших результатов при измерении необходимо следить, чтобы трубка батометра была правильно установлена в горизонтальной и вертикальной плоскостях: навстречу течению (или перпендикулярно к створу) и строго горизонтально. Также необ-

ходимы контрольные (повторные) наблюдения в каждой точке. Батометры-тахиметры удобны для измерения расходов небольших и неглубоких рек, особенно, если нельзя применить вертушку, но дают ненадежные результаты при малых скоростях течения. Представляя прибор, позволяющий измерять скорость в любой точке вертикали, они допускают и работу теми же методами, что вертушка — в отдельных точках и интеграционным.

Однако при чрезвычайной простоте устройства батометра было бы нецелесообразно усложнять его приспособлениями для равномерного опускания и подъема. Поэтому можно применить *суммарный метод* измерения скоростей целым рядом батометров, прикрепленных к штанге на разных друг от друга расстояниях. Взяв совершенно одинаковые батометры, у которых тарировочные кривые почти совпадают, можно, продержав штангу с ними некоторое время в реке, потом слить воду из всех батометров в один общий сосуд, а разделив полученный объем на число батометров и время T, получить средний приток q, соответствующий средней скорости по вертикали. Суммарный метод в таком виде является упрощением интеграционного. Если же воду сливать из каждого батометра отдельно, то суммарный метод превращается в основной, имеющий еще то достоинство, что скорости в различных точках вертикали измерены одновременно, а следовательно, и быстро.

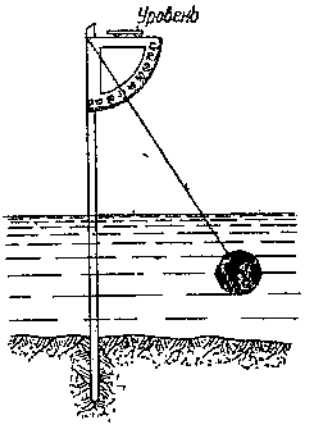


Рис. 132. Гидрометрический маятник.

§ 39. Динамометры. Из довольно многочисленных приборов этого класса большинство в настоящее время сохранило только историческое значение, за исключением разных видоизменений и усовершенствований трубки *Пито*.

Кастелли, ученику *Галилея*, приписывается изобретение в начале XVII века так называемого *гидрометрического маятника* или *речного квадранта* (рис. 132), при помощи которого скорость течения определяется по углу отклонения от вертикали натянутой нити с подвешенным к ней шаром. С увеличением глубины погружения шара и скорости течения нить выгибается и получается неверный отсчет по лимбу. Это обстоятельство, ранее не учитываемое, дало, между прочим, повод старой итальянской школе гидравликов считать, что скорости по вертикали увеличиваются от поверхности к дну. Многие итальянские исследователи применяли гидрометрический маятник в своих работах. Впоследствии нить стали заменять штангой для получения более точных результатов, но и это не дало особенного успеха, так что в конце концов этот прибор стал годиться только для измерения поверхностных скоростей.

Весовые динамометры различных систем были предложены несколькими изобретателями. На рис. 133 изображен безмен *Мейнеке*, в котором давление воды на шар K уравновешивается передвижной гирей G. На том же принципе устроен весовой динамометр *Мичелотти* (1771 г.), в котором шар заменен прямоугольной пластинкой.

На рис. 134 изображен *водяной рычаг Лория* (1777 г.), не требующий особых пояснений. Усовершенствованием его является *тахометр Брюнинга* (1789 г.), показанный на рис. 135, где пластинка P, воспринимающая давление воды, вместе с приспособлением, в котором ходит поддерживающий ее стержень, и блоком может передвигаться вдоль штанги при помощи зубчатой реечки R поворотом ручки r. Давление струй на пластинку, передаваемое нитью n, уравновешивается безменом с передвижной гирей g.[1]

[1] К этому же типу приборов с разнообразными изменениями и усовершенствованиями, не получивших большого распространения, относятся *речной измеритель Франка, гидрометрические весы Черевки, гидрограф Котляревского, флювиограф Шёна, измеритель течения Шау, флюгер Черенкова* и др.

Оригинальное устройство представляет *гидрометрический трос Вильямса* для измерения средней скорости на разных глубинах (рис. 136) одновременно по всей ширине. Он состоит из двух штанг, устанавливаемых по берегам и снабженных лимбами для измерения углов отклонения троса и пружинными динамометрами

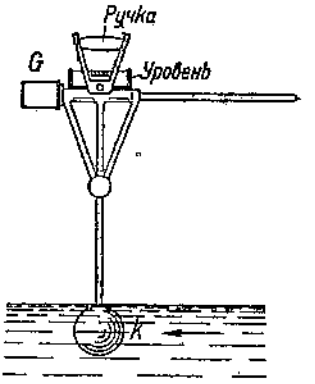


Рис. 133. Бэзмен Мейнеке.

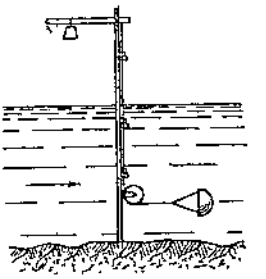


Рис. 134. Водяной рычаг Лорня.

для определения его натяжения. Средняя скорость на глубине, на которой натянут трос, определяется по величине натяжения, длине троса и ширине реки.

Можно упомянуть еще об одном, редко употребляемом типе динамометра для измерения средней скорости в сечении прямоугольного канала — *маятнике Дебинга.*

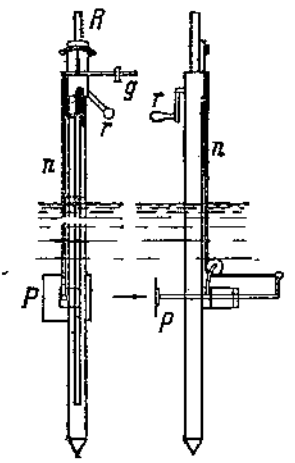


Рис. 135. Тахометр Брюннинга.

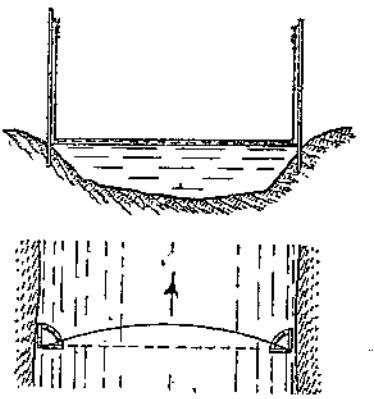


Рис. 136. Трос Вильямса.

Он представляет собой решетку, установленную поперек канала и вращающуюся на горизонтальной оси, закрепленной на дне. Движущийся поток стремится отклонить решетку от вертикального положения, в котором она удерживается наверху пружинным динамометром. Показания последнего, если прибор предварительно протарирован, являются мерой средней скорости или пропорционального ей расхода воды.

Трубка Пито (1732 г.) в первоначальном виде представляла изогнутую под прямым углом, открытую с обоих концов стеклянную трубку (рис. 137), установленную так, чтобы нижняя часть ее была горизонтальна и направлена открытым концом навстречу течению. Благодаря этому уровень воды в вертикальной части трубки поднимается выше уровня свободной поверхности, так как налетающие на входной конец трубки со скоростью v частицы воды производят во входном сечении дополнительное давление на неподвижную воду в трубке. Это давление, зависящее от величины скорости, уравновешивается давлением, производимым столбиком воды высотой h.

В идеальных условиях, т. е. если бы жидкость была идеальная и погруженная часть трубки не нарушала движения потока, имело бы место равенство (65):

$$h = \frac{v^2}{2g},$$

(где g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 *м/сек*^{2}). Отсюда скорость определялась бы по формуле:

$$v = \sqrt{2gh}. \qquad (94)$$

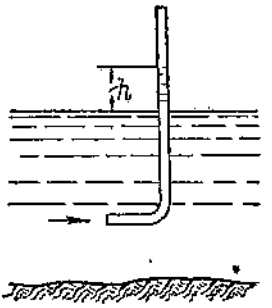


Рис. 137. Трубка Пито.

В действительных условиях, при реальной жидкости (воде) и невозможности не нарушить движения потока введением в него постороннего тела в виде трубки, приходится эту формулу исправить коэфициентом k:

$$v = k\sqrt{2gh}, \qquad (95)$$

который может быть определен тарировкой трубки.

Иначе можно написать:

$$v = \mu\sqrt{h}, \qquad (96)$$

где $\mu = k\sqrt{2g} = 4{,}43\,k$ (для метрических мер).

Коэфициент k при достаточно малых размерах трубки и подходящем, выработанном практикой, очертании погруженной части может иметь значения, весьма близкие к единице.

Чтобы уменьшить сильные колебания уровня воды в трубке, происходящие вследствие пульсации и затрудняющие определение высоты h, *Дюшемен* (1842 г.) сузил входное отверстие трубки, доведя его диаметр почти до 1 *мм*, и для облегчения отсчетов поместил в вертикальной части трубки поплавочек с масштабом. В таком виде трубка *Пито* долгое время употреблялась во Франции.

Дальнейшее усовершенствование трубки *Пито* принадлежит *Дарси* (около 1856 г.). *Большая трубка* последнего изображена на рис. 138 и состоит из двух стеклянных трубок C и D длиной около метра, укрепленных вертикально на доске AB со шкалой, которая при посредстве муфт с зажимными винтами может передвигаться вдоль штанги G. Нижние концы трубок заключены в медную оправу F, и их продолжением служат медные трубки, загнутые внизу под прямым углом. Плоскость входного отверстия c трубки C перпен-

дикулярна к ее оси, и трубка направлена навстречу течению. У трубки D кончик отогнут вниз, и плоскость ее отверстия d перпендикулярна к плоскости отверстия c (параллельна течению). Прибор устанавливается при помощи руля H, и благодаря расположению отверстий вода поднимается в стеклянной трубке C выше, чем в D. В оправе F имеется кран, открывающий и закрывающий одновременно обе трубки при помощи тяжей T. В верхней части стеклянные трубки сообщаются между собой оправой E и с наружным возду-

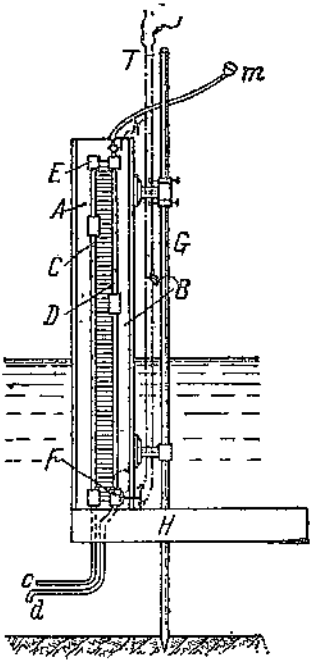


Рис. 138. Большая трубка Пито-Дарси.

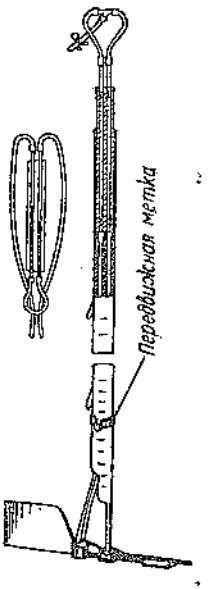


Рис. 139. Карманная трубка Пито-Дарси.

хом краном K, к которому присоединена каучуковая трубка с мундштуком m.

Когда прибор установлен и краны F и K открыты, выждав некоторое время (около минуты), подсасывают воздух мундштуком m, поднимая на удобную для отсчетов высоту уровни воды в трубках, затем закрывают краны, устанавливают указатели на трубках и делают по ним отсчеты h_C и h_D по шкале. Искомая скорость равна

$$v = \mu \sqrt{h_C - h_D}\,. \qquad (97)$$

Если доска со шкалой погружена в воду настолько, что уровень воды в трубке C поднимается доверху, в мундштук m нагнетается воздух, а для отсчетов прибор вынимается из воды.

Карманная трубка Пито-Дарси (рис. 139) состоит из легких, соединяющихся между собой металлических штанг, внутри которых проходят резиновые трубки, приключаемые внизу к приемнику, снабжен-

ному рулем. Приемник состоит из двух горизонтальных, расположенных на одной высоте трубочек, одна из которых (более короткая) имеет боковое отверстие, окруженное металлической гильзой. В верхнем звене штанги помещаются стеклянные трубочки, укрепленные на деревянной шкале. Их верхние концы соединены резиновой трубкой, имеющей отросток с зажимом для отсасывания воздуха.

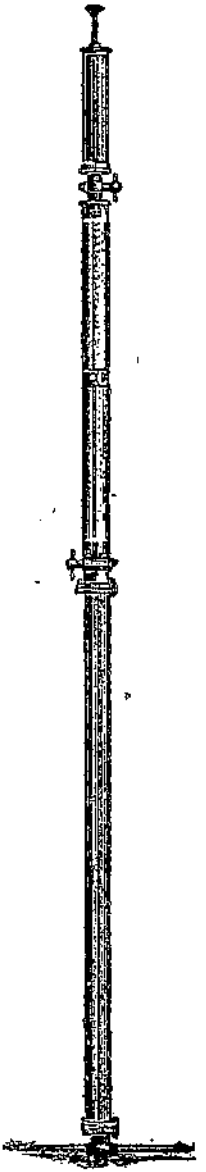


Рис. 140. Трубка Пито-Амслера.

Возможна и иная сборка верхней части: стеклянные трубочки у основания соединяются куском резиновой трубки, в них до половины наливается окрашенная жидкость, а трубки от приемника присоединяются к верхним концам (рис. 139). Образовавшийся манометр действует под влиянием воздуха, сжимаемого водой, входящей в приемник.

Глубина погружения трубки в воду отмечается на штанге особой передвижной скобой, и отсчеты делаются по пружинным передвижным указателям, надетым на стеклянные трубочки.

На рис. 140 показан внешний вид складной трубки *Пито*, выпускаемой в настоящее время фирмой *Амслера*.

Риттер (1871 г.) устроил трубку, приемное устройство которой подвешивалось на тросе с тяжелым грузом и хвостом и соединялось гибкими шлангами с манометром. Это устройство распространения не получило.

Франк (1888 г.) пытался сконструировать трубку для измерения сразу средней скорости по вертикали. В металлической полой штанге он устроил по высоте ее с одной стороны ряд отверстий, часть которых сверху, в зависимости от глубины, может закрываться передвижной муфтой. *Франк* полагал, что вода, входя через отверстия, поднимется в трубке (т. е. штанге) на высоту, соответствующую средней скорости по вертикали, но оказалось, что этот прибор дает весьма неточные результаты, и теоретические предпосылки, положенные в его основу, неверны. Вследствие разности давлений воды на различные отверстия происходит движение воды внутри трубки, и она в действительности измеряет лишь поверхностную скорость потока, не достигая задуманной изобретателем цели.

Для увеличения точности отсчетов высоты h в трубках *Гизелер* предложил применять *дифференциальные жидкостные манометры*, основанные, как известно, на том, что в них достигается увеличение высоты h пропорционально разности удельных весов взятых жидкостей. Так, если взять воду и керосин (удельные веса 1,0 и около 0,9), то можно увеличить в таком манометре разность уровней, даваемую водой, в 10 раз и соответственно повысить точность отсчетов.

Другой прием, применяемый с этой целью, состоит в том, что трубки, по которым делаются отсчеты, располагаются наклонно. Без таких мер трубками нельзя измерять скоростей меньше 0,3 *м/сек*.

1902

Трубки *Пито* применяются сравнительно редко для открытых потоков и чаще для трубопроводов. Достоинствами их является то, что они не имеют подвижных, изнашивающихся частей, что отражается на постоянстве коэфициента μ, и не требуют измерения времени. Кроме того, ими можно измерять скорости в непосредственной близости к дну и стенкам потока, а это весьма ценно для научных исследований и лабораторных работ, где трубки являются основным измерительным прибором для определения скоростей и получили специальные конструктивные особенности. В условиях полевых работ трубки с успехом могут применяться для измерения больших скоростей при небольшой глубине воды, например на быстротоках, лотках и т. п.

Основной недостаток трубок заключается в том, что они измеряют *мгновенную скорость*, которая вследствие пульсации может сильно отличаться от осредненной скорости в данной точке. Для получения истинной средней скорости приходится делать многократные наблюдения, что сильно замедляет работу. Колебания уровня воды в трубках, происходящие вследствии пульсации, еще усиливаются упругостью воздуха, количество которого всегда значительно в воде открытых потоков: при высасывании его из трубок стенки последних густо покрываются пузырьками. При небольших скоростях точность, даваемая трубками, сильно падает. Трубки непригодны для больших глубин, а тарировка их очень затруднительна.

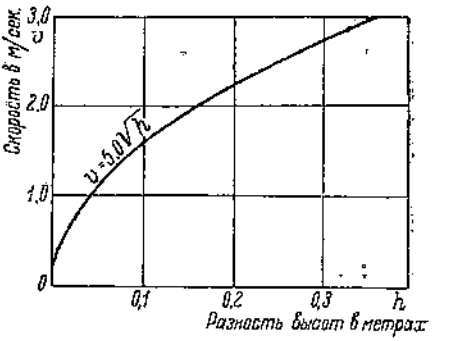


Рис. 141. Тарировочная кривая трубки Пито.

Дарси тарировал трубки тремя путями: сравнением с поверхностным поплавком, передвижением трубки в стоячей воде и определением заранее известного расхода посредством измерения скоростей во многих точках живого сечения. Из трех полученных таким образом значений коэфициента μ в формуле (96) он брал среднее.

Вляшус исследовал различные очертания приемного устройства трубок, определяя в формуле

$$h = c\,\frac{v^2}{2g}$$

коэфициент c, для которого получил значения в пределах от 0,8 до 1,82. Соответственно этому коэфициент μ получается от 3,3 до 5,0.

Единственно точным способом тарировки трубок является сравнение измерений, произведенных трубкой и каким-либо другим выверенным прибором, например вертушкой, причем принимается обычно среднее значение коэфициента μ из нескольких измерений.

Тарировочная кривая трубки, согласно уравнению (99), есть парабола 2-й степени, наподобие изображенной на рис. 141. Если по горизонтальной оси откладывать значения не h, а $\sqrt{h}$, то кривая обратится в прямую линию, tg угла наклона которой к горизонтальной оси равен μ.

Оригинальным видоизменением трубки *Пито* является предложенный в 1929 г. голландцем *Вандерхегге-Цийнен сферический зонд* («подпорный шар»), уже находящий применение в Западной Европе

для измерения скоростей течения в напорных трубопроводах. Этот прибор позволяет определять величину и направление скорости путем измерения и сравнения пьезометрических высот для пяти точек на поверхности шарика, диаметром всего 12 *мм*, как это видно на

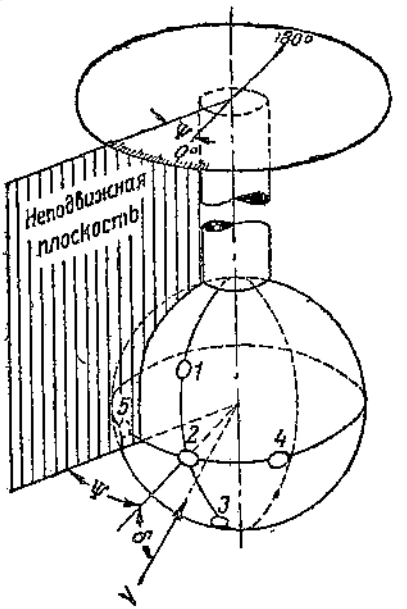


Рис. 142. Сферический зонд Вандерхегге-Цийнена.

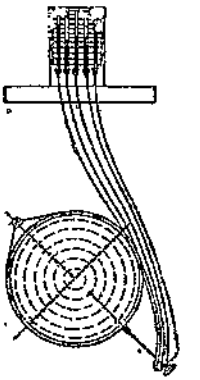


Рис. 143. Установка сферического зонда в трубопроводе.

рис. 142. От каждого из пяти отверстий шарика внутри штанги выведены наружу гибкие трубки к манометрам (рис. 143).

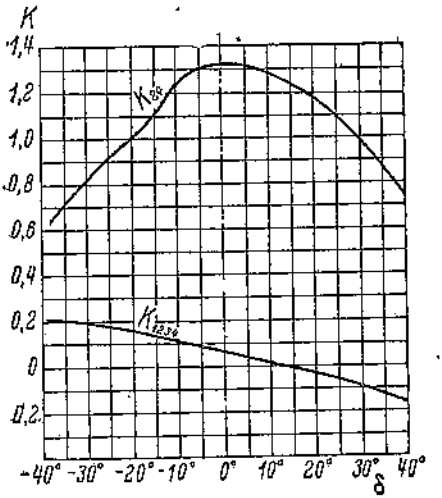


Рис. 144. Тарировочные кривые сферического зонда.

Шарик устанавливается в исследуемой точке сечения потока так, чтобы его меридиональная плоскость *1—2—3* совпала с направлением скорости, для чего зонд поворачивается вокруг своей оси до тех пор, пока давления в отверстиях *4* и *5* не сравняются. После этого по лимбу отсчитывается угол ψ и высоты (давления) h по манометрам.

Чтобы определить угол δ между направлением скорости и экваториальной плоскостью шарика *5—2—4*, необходимо иметь установленную тарировкой зависимость

$$K_{1234} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1} = f(\delta), \quad (98)$$

изображенную на рис. 144.

С изменением угла δ связан и другой, получаемый тарировкой коэфициент

$$K_{24} = \frac{h_2 - h_4}{\frac{\rho}{2} v^2} \tag{99}$$

(ρ — плотность жидкости), откуда

$$v = \sqrt{\frac{h_2 - h_4}{\rho/_2 K_{24}}}. \tag{100}$$

Для применения этого прибора требуется, чтобы движение потока было установившееся, а скорости — не слишком малы (как и для трубки *Пито*). Имеющийся опыт указывает на полную возможность измерения сферическим зондом скоростей в насосных и турбинных трубопроводах с точностью не меньшей, чем даваемая вертушками. В то же время для ввода в трубопровод зонда требуется отверстие минимальных размеров (диаметром около 2 *см*), гораздо меньшее, чем для вертушки.

ГЛАВА III

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ

§ 40. Методы определения расходов. Объемный способ. Расходом жидкости, как известно, называется объем ее, протекающий в единицу времени через поперечное сечение потока. Для рек и каналов расход воды обычно выражается в кубических метрах в секунду (*м³/сек.*), малые расходы (ключей, скважин) удобно выражать в литрах в секунду (*л/сек.*).

До введения метрической системы мер расходы рек у нас давались по преимуществу в кубических саженях в секунду. Англичане и американцы и сейчас выражают их в кубических футах в секунду.[1]

Определение расходов воды в открытых руслах (реках и каналах) представляет основную задачу речной гидрометрии или гидрометрических работ в узком смысле слова. Результаты этих работ, наряду с данными водомерных наблюдений, служат, как уже отмечалось, основой при производстве водохозяйственных расчетов и составлении гидротехнических проектов.

Существует довольно много методов определения расходов воды в потоках. Их можно разделить на 4 основных группы:

1) *непосредственное определение расхода (объемный способ);*

2) определение расхода *по измеренным скоростям и площади поперечного сечения* потока;

3) определение расхода *путем измерения других, кроме скоростей, элементов,* входящих в формулы, даваемые гидравликой, — высоты уровня (напора при истечении через водослив, отверстия и насадки), площади живого сечения, продольного уклона;

4) определение расхода *способами смешения* (химическим, колориметрическим и тепловым).

Из указанных второй способ является наиболее распространенным, будучи применимым к потокам любых размеров и характера, в то время как применение остальных способов ограничено разными обстоятельствами. Рассмотрению его мы и посвятим наибольшее внимание.

Кроме перечисленных методов определения расходов, существуют еще *методы косвенные,* непосредственно не связанные с полевыми измерениями, позволяющие приближенно определять средние и предельные величины расходов (минимальные и максимальные) на осно-

[1] 1 куб. фут равен 0,0283 *куб. м,* 1 куб. саж. равна 9,713 *куб. м.*

ваний изучения зависимости стока от физико-географических факторов. Эти методы рассматриваются в гидрологии.

Непосредственное измерение расхода воды состоит в том, что весь поток на некоторое время перехватывается и отводится в какой-либо сосуд или специальный *мерный ящик*. Определяя время T, в течение которого вода поступала в последний, и объем воды в нем W, нетрудно найти расход потока Q:

$$Q = \frac{W}{T}. \tag{101}$$

Понятно, что таким методом возможно пользоваться лишь для определения небольших расходов — ручейков, канав, ключей, лотков и т. п., так как при этом необходимо устроить приспособления, перехватывающие *всю* воду потока, и располагать сосудом достаточного объема.

На ручье или канаве с этой целью можно соорудить запруду или перепад, чтобы было удобно отвести воду в мерный ящик при помощи подставного лотка. Нужно выждать, чтобы после устройства запруды движение *установилось* (т. е. чтобы подъем воды, вызванный запрудой, прекратился), и следить за тем, чтобы вся вода потока перехватывалась лотком. Для получения точных результатов необходимо также хорошо наладить операцию впуска и прекращения доступа воды в мерный ящик в моменты начала и конца отсчета времени по секундомеру.

Объем мерного ящика или сосуда зависит от величины расхода и требуемой точности измерения. Если считать, что он может быть определен вполне точно, тогда ошибка в определении расхода Q будет зависеть от точности отсчета времени T.

Из формулы (101) получаем:

$$dQ = -\frac{W}{T^2}dT,$$

или, заменяя T через $\frac{W}{Q}$:

$$dQ = -\frac{Q^2}{W}dT,$$

откуда

$$W = -\frac{Q^2}{dQ}dT. \tag{102}$$

(Знак минус получается потому, что $W = Q \cdot T$, и при увеличении одного из множителей Q или T при постоянном W, другой уменьшается.)

Если нужно измерить расход с точностью до 1%, а время измеряется с точностью до 1 секунды (включая ошибку в определении моментов начала и конца измерения), то $dQ = 0{,}01\ Q$ и $dT = 1$, и формула (102) дает:

$$W = |100Q|.$$

Время измерения $T = 100$ *сек.*

При 2%-й точности измерения расхода получим:

$$W = |50Q|$$

и $T = 50$ *сек.*

Точность измерения расхода можно повысить, более точно определяя время и моменты начала и конца измерений, а также объем W или, оставляя точность неизменной, можно уменьшить потребный объем мерного ящика за счет повышения точности отсчета времени.

При очень небольших расходах воды можно определять ее объем ведром (нормальное русское ведро вмещает 0,0123 $м^3$ чистой воды при температуре 13° по Реомюру) или взвешиванием воды на весах (1 $л$ весит 1 $кг$).

В мерных ящиках объем воды также может измеряться ведрами или взвешиванием. Если ящик имеет призматическую форму и горизонтальное дно, то объем воды удобно определяется вычислением по площади поперечного сечения и измеренной глубине воды.

Для уменьшения объема мерного ящика служит показанное на рис. 145 устройство. Когда вода, поступающая через отверстие, закрываемое щитком Z_1, наполнит камеру I до высоты стенки b, разделяющей ящик на две равных части, задвигается щиток Z_1 и открывается Z_2, после чего вода поступает в камеру II. Одновременно с этим открывается отверстие a_1, через которое вода выливается из

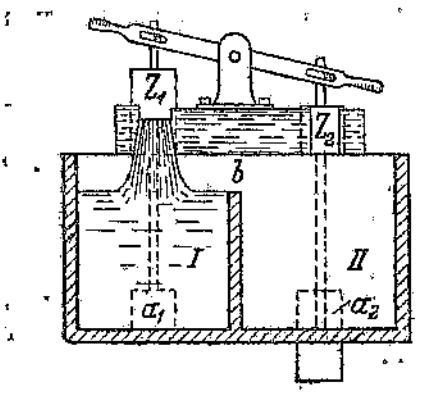


Рис. 145. Водомерный ящик.

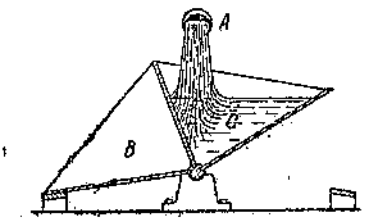


Рис. 146. Водомер Мильна.

камеры I, и закрывается отверстие a_2 в камере II. Зная объем камер и число передвижений рычага, управляющего затворами, можно определить количество протекшей воды.

На рис. 146 изображен качающийся *водомер Мильна*, в котором вода, поступающая из трубы A, поочередно наполняет две камеры треугольного сечения B и C. Когда одна из камер наполнится до края, она опрокидывается под действием веса воды, вода из нее выливается, и наполняется другая камера. Число качаний прибора учитывается счетчиком, а расход воды — по объему камер и числу качаний. Водомер такого устройства установлен и с успехом работает на одной из украинских гидрологических станций.

К видоизменениям объемного способа можно также отнести метод солевого экрана *Аллена* (§ 24), если его применять к потокам переменного поперечного сечения. В этом случае вычисляется объем воды между двумя сечениями, в которых регистрируется прохождение солевого облака, и затем делится на время пробега облака, т. е. используется основная формула объемного способа (101). Этот метод дал вполне удовлетворительные результаты, будучи примененным на некоторых американских гидростанциях для определения расхода воды в турбинных камерах. По точности он, конечно, уступает основному объемному методу, что связано также с затруднениями при установлении того объема воды, который входит в основную формулу,

так как из полного объема должны быть вычтены его части, не участвующие в сквозном движении потока (застойные и мертвые водоворотные области).

§ 41. Определение расхода по скорости и площади поперечного сечения. Модель расхода. При измерении в разных точках поперечного сечения потока скоростей (поплавками, вертушками и др. приборами) эти последние, как мы уже знаем, получаются неодинаковыми. Неодинаковыми поэтому будут также расходы воды, проходящие через отдельные элементы площади поперечного сечения.

Представим себе поперечное сечение потока вертикальной плоскостью (рис. 147). Начало координат расположим в точке O пересечения свободной поверхности с линией берега (*урез воды*) и направим ось глубин h вертикально, а ось расстояний l горизонтально. Расход dQ через бесконечно малую площадку $d\Omega = dh \cdot dl$, выделенную около точки с координатами h и l, скорость в которой есть v, равен:

$$dQ = d\Omega \cdot v \cdot \cos\alpha,$$

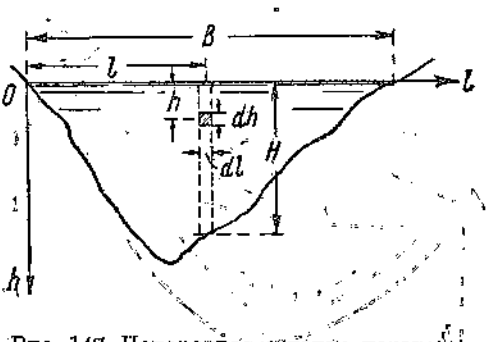


Рис. 147. Поперечное сечение потока

где α — угол между нормалью к площадке и направлением скорости в точке (h, l), причем

$$v = F(h, l). \tag{103}$$

Расход Q через всю площадь поперечного сечения Ω:

$$Q = \int_{\Omega} v \cos\alpha \, d\Omega = \int_0^B \int_0^H v \cos\alpha \, dh dl \tag{104}$$

или, обозначая проекцию скорости на нормаль к сечению $v \cos\alpha$ через v_n:

$$Q = \int_0^B \int_0^H v_n dh dl. \tag{105}$$

Если бы скорости v во всех точках сечения были параллельны между собой, т. е. $\cos\alpha = \text{const}$, то можно было бы написать:

$$Q = \cos\alpha \int_0^B \int_0^H v dh dl, \tag{106}$$

Если бы к тому же взятое поперечное сечение Ω было перпендикулярно к скоростям, то оно превратилось бы в *живое сечение* ω и расход Q выражался бы формулой

$$Q = \int_0^{B_0} \int_0^H v dh dl. \tag{107}$$

Если бы были определены средние скорости на вертикалях v_i при бесконечно большом числе вертикалей, то расход через вертикальную полоску сечения шириной dl и высотой H равнялся бы:

$$dQ = Hdl\,v_v,$$

а полный расход

$$Q = \int_0^{B_0} Hv_v\,dl. \qquad (108)$$

При параллельноструйном движении и плоскости поперечного сечения, составляющей угол α с живым сечением, было бы, очевидно,

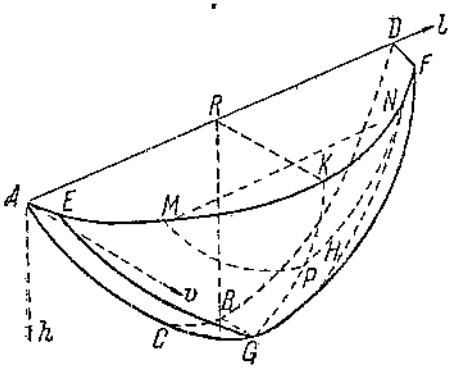


Рис. 148. Модель расхода.

$$Q = \cos\alpha \int_0^{B} Hv_v dl\,. \qquad (109)$$

Обозначая среднюю для всего живого сечения скорость через V, мы имели бы:

$$Q = \omega V = \cos\alpha\,\Omega V. \qquad (110)$$

Таким образом, на $\cos\alpha$ приходится умножать или действительные скорости или взятую площадь поперечного сечения, средняя же для всего сечения скорость V может быть найдена из (110) лишь после того, когда определен расход и площадь поперечного сечения.

В естественных потоках, как уже отмечалось (§ 18), мы никогда не имеем «параллельноструйного» движения,[1] и поэтому и живое сечение не может быть плоским. Тем не менее мы будем употреблять этот термин в дальнейшем, понимая его условно как то вертикальное плоское поперечное сечение, которое *ближе всего* подходит к истинному живому сечению. Такого приближения можно в некоторой степени достигнуть надлежащим выбором участка потока и расположением линии сечения (*створа*) в плане, что особенно важно при измерении скоростей приборами, дающими не величину $v\cos\alpha$ (эту величину с известным приближением дают лишь штанговые вертушки с горизонтальной осью, направленной перпендикулярно к створу), а действительную величину v, независимо от направления створа (поплавки, все вертушки на тросе, чашечные вертушки с вертикальной осью). В этом случае от выбора участка для измерений и расположения створа будет тесно зависеть и точность определения расхода.

Геометрически двойной интеграл формулы (107) представляет объем (рис. 148), заключенный между живым сечением *ACBDA* и криволинейной поверхностью *EKFGE*, уравнение которой: $v = F(h, l)$, ограниченный сверху свободной поверхностью потока *ADFKEA* и по бокам и снизу поверхностью русла *AEGHFDBCA*. Практически

[1] Т. е. параллельности осредненных местных скоростей.

можно принять, что это — прямой цилиндр с основанием в виде плоского сечения ω, срезанный криволинейной поверхностью $v = F(h, l)$. Это водяное тело и носит название *модели расхода*. Определение его объема, а следовательно, и расхода потока сводится к измерению площади живого сечения и ординат криволинейной поверхности, т. е. скоростей v в отдельных точках живого сечения.

Пересечение модели расхода вертикальными плоскостями, перпендикулярными к плоскости живого сечения, дает эпюры распределения скоростей по вертикалям $BKGB$, а пересечение такими же плоскостями, но параллельными живому сечению, дает изотахи MNP. Пересечение же горизонтальными плоскостями дает эпюры распределения скоростей на разных глубинах, в частности кривая EKF есть эпюра поверхностных скоростей.

В первом случае, при $l = \text{const}$, из уравнения (103) получаем (16):

$$v = f(h),$$

во втором случае, при $v = \text{const}$,

$$F(h,\ l) = \text{const},$$

в третьем случае, при $h = \text{const}$,

$$v = \varphi\ (l).$$

Если спроектировать кривую EGF на горизонтальную плоскость, то получим эпюру донных скоростей.

Такой же по величине объем модели расхода при параллельноструйном движении представляет, очевидно, двойной интеграл в формуле (105), с той лишь разницей, что его основание есть любое поперечное сечение площадью $\Omega = \frac{\omega}{\cos\alpha}$, а высоты отдельных точек: $v_n = \cos\alpha$, так как угол α есть в то же время угол между плоскостями живого и взятого поперечного сечения. Если движение не параллельноструйное, то угол α переменный от точки к точке и должен учитываться при каждом измерении скорости.

Площадь поперечного сечения потока легко может быть определена путем *промеров глубин*, зависимость же (103) $v = F(h, l)$ нам неизвестна, и только измерением скоростей в отдельных точках поперечного сечения мы можем приближенно определить вид этой криволинейной поверхности, а следовательно, и объем модели расхода или расхода потока. Ясно, что результат получится тем более точный, чем в большем числе точек поперечного сечения будут определены скорости.

Таким образом, для определения расхода по этому методу необходимо измерить:

1) площадь поперечного сечения потока,

2) в возможно большем числе точек составляющие скорости, нормальные к плоскости поперечного сечения.

Выбором подходящего для измерений участка и расположения створа можно добиться значительного уточнения результатов измерений и упрощения самого их производства. Поэтому прежде чем переходить к описанию работ по определению расхода и их обра-

ботке, коснемся вопроса о выборе участка и установлении створа для измерений.

§ 42. Выбор участка для определения расхода. В основном требования, предъявляемые к участку потока при определении расхода путем измерения скоростей, уже были разобраны в § 11.

Они сводятся к следующему:

1) Желательно выбрать прямолинейный участок длиной, по возможности, не менее пятикратной ширины, с руслом призматической формы, т. е. с однообразными по длине участка глубинами и шириной, и постоянным продольным уклоном водной поверхности. Очевидно, такой участок будет представлять наилучшие условия и для параллельноструйного движения. Если нельзя найти прямого участка, можно допустить небольшое искривление. Наилучшей формой поперечного сечения является приближающаяся к корытообразному или параболическому профилю.

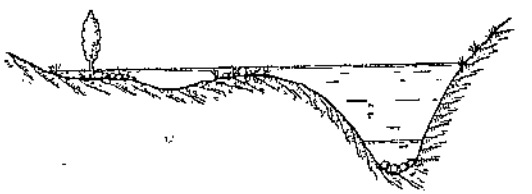


Рис. 149. Поперечный профиль, неудобный для измерений.

2) На выбранном участке, а также непосредственно выше и ниже его не должно быть притоков или сооружений (мостов, плотин и пр.), вызывающих переменный подпор, поперечный уклон, косоструйность и другие явления, влияющие на точность измерений; следует избегать участков, на которых образуются ледяные заторы. Хотя измерения расхода и могут делаться в пределах распространения подпора, но это обстоятельство сильно усложняет установление зависимости между расходами и уровнями.

3) Важным условием с точки зрения установления этой зависимости является и неизменяемость русла на выбранном участке, хотя добиться выполнения этого условия в полной мере на некоторых реках бывает невозможно.

4) Необходимо выбрать участок, где поток течет в одном русле, по возможности при мало изменяющейся ширине. Чрезвычайно неудобны для измерений поперечные сечения, наподобие показанного на рис. 149. Помимо трудности производства работ, в этом случае при значительном изменении расхода уровень изменяется очень слабо (при высоких горизонтах). Важно также, чтобы скорости течения были не слишком малыми (например, при измерениях вертушкой не меньше 10—15 *см/сек.*) и не слишком большими (до 2,5—3,0 *м/сек.*), так же, как и глубины. Поэтому на глубоких и быстрых реках рекомендуется выбирать участки широкие и мелкие, а на реках с медленным течением — участки с сжатым руслом.

5) Избранный участок должен быть по возможности защищен от сильного влияния ветров, что особенно существенно для измерения поверхностных скоростей.

6) Если производятся длительные измерения расходов, имеющие целью изучение режима потока, то желательно, чтобы участок был типичным в смысле общего характера течения и продольного уклона.

7) Наконец, на выбор участка влияют условия финансового характера, связанные с целью измерений и их продолжительностью, пути сообщения, стоимость оборудования, близость населенных пунктов и пр.

Конечно, удовлетворить в полной мере всем перечисленным требованиям далеко не всегда удается. Строгость их выполнения обусловливается не только природными возможностями, но и характером измерений: устраивается ли постоянная, с большой программой работ гидрометрическая станция, или временный створ, или производится одиночное измерение расхода. Оказывает влияние и то, какими приборами будет производиться измерение скоростей (например вертушками или поплавками). В зависимости от всех этих обстоятельств и требования, предъявляемые к участку, могут значительно изменяться.

Створ, т. е. поперечное сечение, в котором измеряются скорости, располагается посередине избранного участка, или, лучше, несколько ниже по течению, примерно так, чтобы разделить участок в отношении 2 : 1. В створе или рядом с ним устраивается водомерный пост для привязки определяемых расходов к высоте уровня (на постоянных гидрометрических станциях устраивается часто несколько постов: створный и уклонные посты на одном или на обоих берегах).

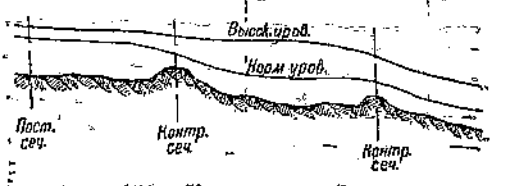


Рис. 150. „Контрольные" сечения.

Американская гидрометрическая практика при выборе участка для определения расходов обычно выделяет три поперечных сечения потока:

1) постовое сечение, где устраивается водомерный пост,

2) «контрольное» сечение, обеспечивающее существование правильной однозначной связи между расходами потока и уровнями на водомерном посту,

3) створное сечение, в котором производятся измерения скоростей.

Для первого сечения требуется подходящий поперечный профиль русла (однообразной, правильной формы при всех горизонтах воды, не слишком широкий); с устойчивым ложем, не подверженный случайному подпору (от заторов льда, лесных заломов, притоков и т. п.), удобный для устройства поста и расположенный выше хорошего контрольного сечения.

Контрольное сечение представляет естественную или искусственную постоянную преграду (например, выход каменных пород на дне реки, пороги, водопад, каменную наброску), так сказать, естественный водослив, расход, через который определяет высоту уровня воды и уклон поверхности в постовом сечении. При высокой воде контрольное сечение может оказаться неудовлетворяющим своему назначению (рис. 150) и переносится ниже. «Чувствительность» контрольного сечения, т. е. соотношение между изменениями уровня и расхода, зависит от его ширины.

Створное сечение совмещается с постовым сечением или располагается где-нибудь в другом месте, иногда в значительном расстоянии от него (если можно считать расходы через оба сечения равными). К выбору участка для створного сечения уже не предъявляется требования устойчивости русла. Он должен быть по возможности прямолинейным, с равномерным и параллельноструйным движением и руслом правильного поперечного очертания. К нему применимы также требования, связанные с удобством производства измерений (см. выше п. 4).

За выбором участка и места для створа, в связи с характером гидрометрических работ, может следовать осмотр дна и его расчистка от крупных камней, коряг, водяных растений и т. п. Особенно

нуждается в расчистке русло горных рек, где значительная часть расхода может протекать между камнями и в слое хряща на дне.

Иногда на каналах (осушительных и оросительных) устраивают специальные *контрольные русла*, путем планировки и укрепления на некотором участке откосов и дна канала деревянной обшивкой или бетоном. По нескольким измерениям расхода при разных горизонтах устанавливается кривая расходов (см. гл. IV), которая служит затем для учета расходов по наблюдениям над уровнем. Роль контрольного русла может исполнять лоток или жолоб при небольших плотинах.

Если участок выбирается для гидрометрической станции, то для окончательной его оценки и назначения створов производится плановая и высотная съемка его, захватывая полосу наивысшего разлива, и промеры глубин, после чего вычерчивается план в горизонталях с показанием *изобат* (линий равных глубин) и поперечные профили.

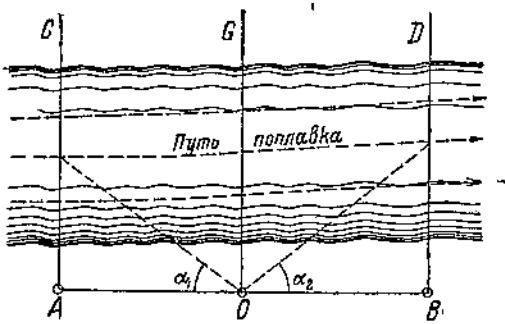


Рис. 151. Установление направления створа (1-й способ).

§ 43. Установление направления створа и его закрепление. Как указывалось в § 41, направление створа в плане имеет особенно важное значение при измерении скоростей приборами, дающими величину действительной скорости, а не проекции ее на нормаль к сечению; в этом случае створное сечение должно быть по возможности ближе к живому сечению, т. е. перпендикулярно к общему (среднему) направлению струй. Такое сечение теоретически должно иметь наименьшую площадь из всех возможных поперечных сечений в данном месте реки, а потому оно, казалось бы, должно быть удобным и практически, так как створ получается самый короткий. Однако, установление направления створа, исходя из этих соображений, довольно затруднительно, так как линии уреза воды в плане всегда имеют не совсем прямолинейное очертание, отклонение же от перпендикуляра даже на 10° при строго параллельных берегах дает увеличение длины створа всего на 2%.

На прямых участках небольших и нешироких рек вполне возможно назначение направления створа на-глаз (с точностью примерно до 5°) или по плану реки в изобатах. На реках же широких, особенно при не вполне правильном очертании русла, приходится прибегать к более сложным приемам.

Можно сначала (рис. 151) разбить на берегу магистраль AB, направление которой приблизительно параллельно течению, и два перпендикулярных к ней створа AC и BD. Затем, установив на магистрали в точке O около середины мензулу или теодолит, надо засекать точки прохождения поплавков (поверхностных или, лучше, глубинных) через створы, нанося их на план непосредственно на

мензульном планшете или по углам α_1 и α_2. Пуская несколько поплавков по всей ширине реки, можно довольно точно по плану выяснить их общее направление, по которому и установить окончательное направление основного створа OG, которое переносится потом на местность.

Другой способ состоит в том, что в одном из предварительно намеченных параллельных створов (рис. 152), примерно посередине реки, устанавливается лодка, с которой выпускаются поплавки в точке N в верхнем створе AC. Точки пересечения поплавками нижнего створа BD засекаются угломерным инструментом из конца магистрали A, причем определяется среднее значение угла α. Затем из точки B засекается положение точки N и определяется угол β. Если длина магистрали AB равна L, то $AN = L \operatorname{tg} \beta$, $BM = L \operatorname{tg} \alpha$.

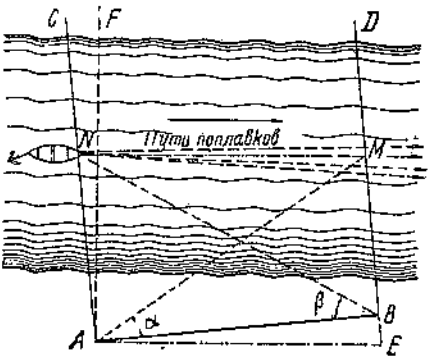


Рис. 152. Установление направления створа (2-й способ).

Линия AE, параллельная среднему направлению течения, получается откладыванием из точки B по продолжению створа BD расстояния BE, которое равно

$$BE = AN - BM = L(tg\,\beta - tg\,\alpha).$$

Перпендикулярно к AE разбивается створное сечение AF.

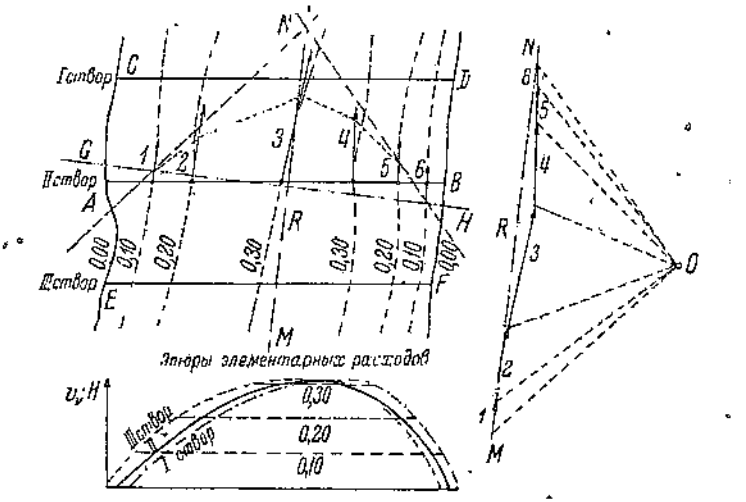


Рис. 153. Установление направления створа по методу Жуковского.

Недостатком описанных простых способов является то, что ими учитывается движение лишь нескольких поплавков, которое может быть случайным. Более точное определение среднего для всего сечения направления скоростей может быть сделано по способу *«линий равных элементарных расходов»*, предложенному *Жуковским*.

Для этого на трех соседних створах (рис. 153) производятся на нескольких вертикалях измерения скоростей вертушкой и вычерчиваются эпюры распределения скоростей по вертикалям. Площадь каждой эпюры $v\,H$ есть так называемый *элементарный расход*, протекающий через вертикальную полоску высотой H (глубина вертикали) и шириной, равной единице (см. рис. 147). Откладывая значения $v_0 H$ на ширине реки по створам в соответственных точках в некотором масштабе вверх и проводя плавные кривые, получаем эпюры элементарных расходов (рис. 153). На них проводим горизонтальные линии через круглые значения $v_0 H$ (например, 0,1, 0,2, 0,3 ...) и точки пересечения их с кривыми переносим на створы, где по ним и проводим плавные линии равных элементарных расходов, наподобие изобат. Затем делим ширину реки на среднем створе на части, намечая точки раздела посередине между соседними линиями равных элементарных расходов, и перемножаем части ширины на соответствующие круглые значения $v_0 H$, получая *частичные расходы* (см. § 49). Эти последние откладываем в виде векторов по касательным к линиям равных элементарных расходов в среднем створе (стрелки *1, 2 ... 6*) и по ним строим веревочный многоугольник *OMN*, на которого определяется направление равнодействующей *MN*, долженствующей быть перпендикулярной к окончательному створу *GH*.

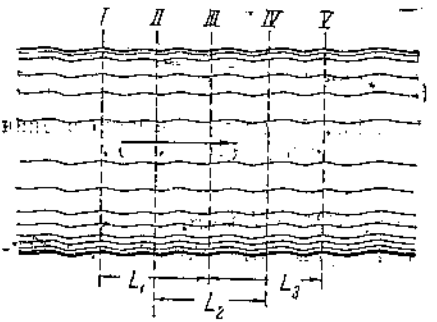


Рис. 154. Схема разбивки створов.

Для упрощения этого способа *Моисеенко* предложил проводить линии равных расходов, измеряя лишь поверхностные скорости, т. е. вместо значений $v_0 H$ оперировать с так называемыми *фиктивными элементарными расходами* $v_0 H$. С этой целью необходимо разбить 5 параллельных створов (рис. 154), промерить глубины на трех средних створах и затем отмечать места пересечения поплавков с этими тремя створами и время хода поплавков последовательно между створами *I—III*, *II—IV* и *III—V*.

На основании этих данных задача может быть решена по методу *Жуковского*. Так как тщательное установление направления створа особенно важно при поплавковых измерениях, то такое упрощение весьма уместно.

При различных стояниях уровня воды, особенно на реках с неустойчивым руслом, направление скоростей течения может изменяться в довольно широких пределах. Поэтому даже при правильном и постоянном русле следовало бы определять положение створного сечения хотя бы для трех состояний реки: в межень, в высокую воду и зимой (при ледяном покрове).

После окончательного установления направления основного или, как его называют, «рабочего» створа, он закрепляется на обоих берегах прочными незатопляемыми знаками или реперами, которые обычно в то же время служат высотными опорными точками. От одного из реперов отсчитываются расстояния до тех точек створа, в которых производятся измерения.

На небольших ручьях по линии створа перекидывается мостик, служащий для установки гидрометрических приборов. На реках шириной 200—300 *м*, а иногда до 600 *м*, по створу натягивается размеченный по длине канат или стальной трос, один конец которого навивается на деревянный вертикальный *ворот* (рис. 155) или ле-

бедку. На очень широких реках канат приходится поддерживать промежуточными лодками, устанавливаемыми на якорях через 100—200 *м*, или поплавками (буйками) в виде, например, пустой бочки, прикрепленной к якорю или грузу на блоке (рис. 156-*а*). На реках мелких и с медленным течением промежуточными опорами для каната могут служить рогатки из жердей (рис. 156-*б*).[1]

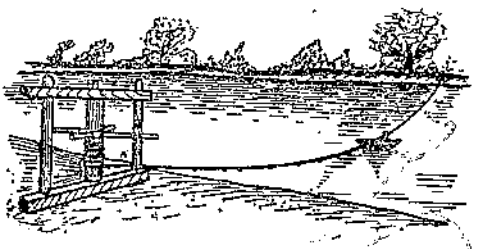


Рис. 155. Ворот для натягивания троса.

На судоходных реках для пропуска судов и плотов трос или канат приходится опускать на дно или, наоборот, высоко поднимать, например, при помощи устройства, показанного на рис. 157. Чтобы избежать связанных с опусканием или поднятием троса неудобств, на судоходных реках часто отказываются от створного троса, заменяя его отдельными буйками, расставленными по линии створа. Для ориентировки на реке во время измерений, на обоих берегах устанавливается по паре створных вех.

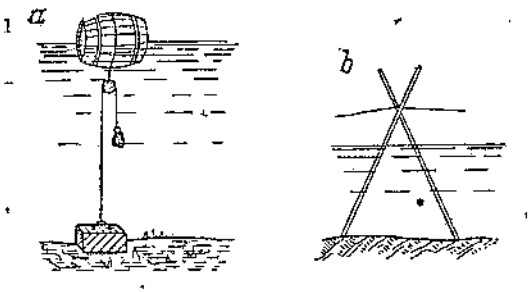


Рис. 156. Приспособления для поддержания троса.

§ 44. Промеры глубин. Для промеров глубин употребляются обычно следующие приборы: 1) *рейка*, 2) *наметка* (*футшток*) и 3) *лот*.

Рейкой (обыкновенной нивелировочной) можно пользоваться для промеров неглубоких рек. Наметка или футшток представляет деревянный шест круглого сечения, диаметром 4—6 *см* и длиной от 6—7, а иногда и до 10 *м*, в зависимости от глубин, подлежащих измерению. Нижний конец футштока оковывается легким железным башмаком, основание которого совпадает с нулем футштока. Футшток окрашивается сначала белой масляной краской, а по ней целые дециметры через один покрываются красной или черной краской (удобно чередовать краски через метр) и надписываются цифры.

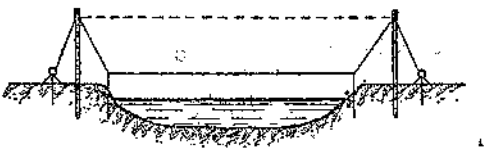


Рис. 157. Подъемный трос.

При глубине в 5—6 *м* и большой скорости течения наметка становится неудобной в обращении и приходится прибегать к лоту. Последний (рис. 158) устраивается из груза, привязанного к размеченному шнуру. Грузу часто придается пирамидальная форма, вес

[1] Более подробно об оборудовании створа сказано ниже в § 48.

его, смотря по скорости течения, может колебаться в широких пределах от 4—6 до 80—100 *кг*. Шнур делается из прочной бечевы, толщиной 3—5 *мм*, размеченной в сыром виде через 10 *см* при помощи кожаных марок различной формы и цветных лоскутков. Более прочным и надежным в смысле неизменности длины является лот на гибком тросе толщиной 2½—3 *мм*. Момент прикосновения груза к дну легко определяется по ощущению в руке или по уменьшению натяжения шнура.

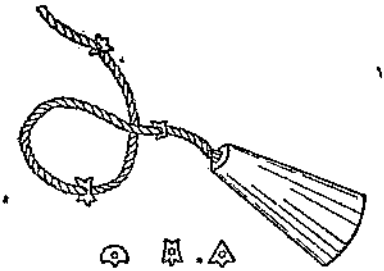


Рис. 158. Ручной лот.

Глубина может измеряться также штангой от вертушки и вертушкой на тросе, что всегда и делается при измерении вертушкой скоростей на вертикали. При больших глубинах и скоростях лот угоняется течением, а шнур выгибается по кривой линии, в виду чего приходится вводить поправки в отсчеты (см. § 30).

При производстве массовых промеров на большом протяжении (главным образом для целей судоходства) иногда применяются особые суда, снабженные приспособлениями для *непрерывных промеров*.

Простейшая *навигационная рейка* (*а* на рис. 159) прикрепляется к плоту *П*, вращается около горизонтальной оси *О* на уровне воды и имеет на нижнем конце тяжелый башмак *b*. Длина надводной части рейки в 5 раз короче подводной. Прикладывая к верхнему концу планку с уровнем *е*, можно по вертикальной рейке *С*

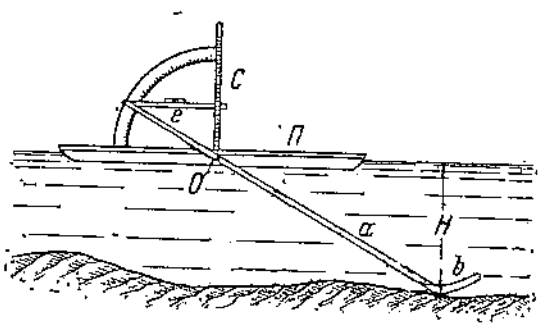


Рис. 159. Навигационная рейка.

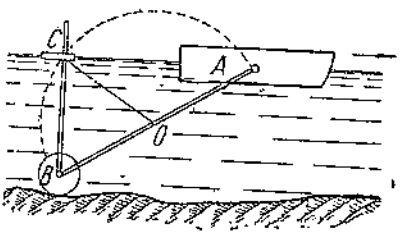


Рис. 160. Рейка Буцмана.

прочитать глубину воды, уменьшенную в 5 раз. Вместо этого можно устроить сектор с делениями, показывающими непосредственно глубину воды.

Навигационная рейка *Буцмана* (рис. 160) вращается около точки *А*. Мерная рейка *ВС* всегда вертикальна благодаря скользящему по ней поплавку *С*, который стержнем *СО* связан шарнирно с точкой *О* (посредине длины *АВ*), так что угол *АСВ* всегда прямой.

Из самопишущих промерных аппаратов наиболее распространен прибор *Штехера* (рис. 161). Он состоит из двух спаренных лодок, между которыми опускается на дно и скользит по нему железная рама, вращающаяся в верхней части на горизонтальном валу, повороты которого передаются самопишущему прибору. Такой аппарат применялся при промерах на р. Эльбе еще в конце прошлого столетия. Его основные недостатки: громоздкость и непригодность для поперечных промеров вследствие бокового давления струй на штангу.

Служащий для той же цели *профилограф Гайоша* состоит из барабана, катящегося по дну за лодкой или судном. Внутри барабана заключен цилиндр, наполненный воздухом и воспринимающий гидростатическое давление воды, пропорциональное глубине погружения. Показания манометра передаются самопишущему прибору. Этот аппарат требует очень точной тарировки и, так как все устройства находятся под водой, не дает возможности контроля.

Имеются и русские приборы этого рода. Так, прибор *Серебрякова* представляет усовершенствование аппарата *Штехера*. В нем промерная штанга сделана легкой трубчатой, с универсальным шарниром, уменьшающим опасность зацепления за дно, и кроме того усовершенствован регистрирующий аппарат. Прибор *Мунга* основан на отклонении связанного с вертикальной промерной штангой рычага на углы, соответствующие высоте уклонений дна реки от горизонтальной линии. Отклонения рычага регистрируются электрической передачей.

Для получения поперечного сечения потока по заданному створу (любому) можно итти двумя путями: 1) промеряя глубины только по створу и 2) промеряя глубины на некотором участке потока в точ-

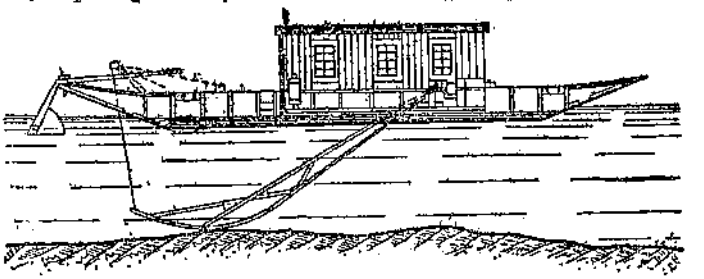


Рис. 161. Аппарат Штехера.

ках, не расположенных на определенных створах, и составляя план участка русла в изобатах или горизонталях, по которому легко построить поперечное сечение потока для любого створа. На небольших и мелких потоках съемка плана участка русла обычно делается по *поперечникам* (створам), на больших же и широких реках предпочтение отдается другим методам (см. ниже). И тот и другой способ находят применение также в зависимости от характера и объема исследований — нужно ли промерить только одно сечение или к тому же сделать съемку русла на некотором протяжении.

Производство промеров вообще можно подразделить на такие способы:

1) промеры *по тросу* или *бечеве*,
2) промеры *с засечками*,
3) промеры *по косым галсам* и *продольникам*.

Промеры по первому способу суть в то же время промеры по створам или поперечникам, второй способ может применяться и для промеров по створам и без них. Третий способ, наименее точный, применяется исключительно для съемки русла, чаще всего при предварительном обследовании участка.

При всех промерах должны производиться возможно частые наблюдения над колебаниями уровня воды на постоянном или временном водомерном посту в районе работ.

Промеры по тросу или бечеве удобны для рек шириной до 150—200 *м*. Перетянутый поперек реки трос (бечева) размечается

по длине через каждый метр при помощи медных бляшек с выбитыми на них цифрами или цветных лоскутков. Разметки бечевы должны делаться в натянутом ее состоянии и возможно чаще проверяться. Самое натягивание удобно производить талями или воротом.

Вдоль троса передвигается лодка, с которой против определенных марок (меток) на нем и делаются промеры глубин. Одновременно с отсчетом глубины, обыкновенно отмечается и грунт дна (камень, песок, ил). Промеры глубины в каждой точке делаются не менее двух раз, и из полученных отсчетов берется среднее. Если на футштоке есть деления через 5 *см*, то отсчеты делаются на-глаз с точностью до одного сантиметра.

Расстояния между промерными точками зависят от ширины реки, характера дна и желательной степени подробности его освещения.

Число промерных точек в поперечнике назначается обычно не менее 10. Так, берут:

при ширине реки до 10 *м*		точки через	1 *м*
„ „ „	от 20 до 50 *м*	„	2 „
„ „ „	„ 50 „ 100 „	„	2—3 *м*
„ „ „	„ 100 „ 200 „	„	3—5 „
„ „ „	более 200 „	„	5—10—20 *м*

Иногда в местах быстрого изменения глубин (у берегов) точки располагаются чаще.

Промеры с *засечками* угломерным инструментом — чаще всего мензулой с кипрегелем, иногда теодолитом или пантометром — применяются при ширинах реки более 150—200 *м*. Промеры делаются с лодки, передвигающейся на веслах, моторного катера и т. п. На берегу разбивается базис, в одном из концов которого устанавливается угломерный инструмент. Если промеры делаются по створу (рис. 162), то для ориентировки лодки на берегах ставятся створные вехи.

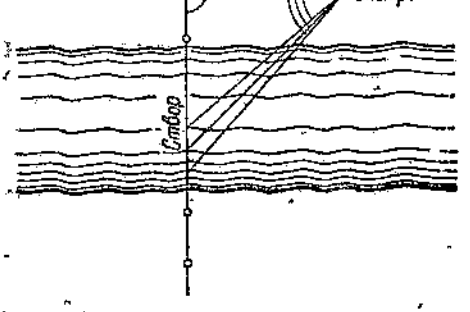


Рис. 162. Промеры с засечками по створу.

Засечки могут делаться двояким образом: или промерщик подает сигнал мензульщику, который следит в трубу за лодкой и засекает в этот момент ее положение, или мензульщик, разметив на планшете промерные точки, сам дает сигнал промерщику, который все время держится с лодкой в створе, передвигаясь вдоль него. В момент сигнала и производится измерение глубины. Второй способ обеспечивает равномерное распределение промерных точек.

Большей частью засечками определяются не все промерные точки, а лишь через известное число промеров, например, четыре точки промеряются без засечек, а пятая засекается и т. д. Расстояния между промежуточными точками определяются по числу гребков или по секундомеру.

Если быстрое и неправильное течение или другие причины затрудняют передвижение лодки по створу, то засечки могут делаться

двумя мензулами, причем промеры захватывают уже некоторый участок по длине реки (рис. 163).

В обоих случаях, для возможности достаточно точного определения положения промерных точек, необходимо следить, чтобы углы пересечения линий, определяющих положение точек на плане, не были слишком острыми (не менее 15—20°).

Промеры по *косым галсам* (рис. 164) производятся при перемещении лодки от берега к берегу по зигзагообразной линии *ABCDE*.

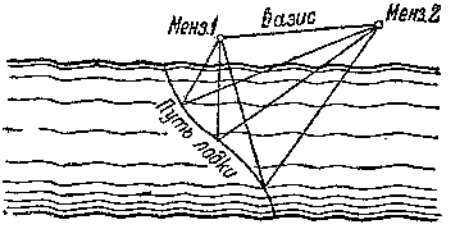


Рис. 163. Промеры с засечками двумя инструментами.

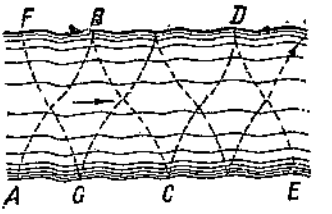


Рис. 164. Промеры по косым галсам.

В случае значительной ширины реки применяется двойная система перекрестных галсов или тройные и четверные галсы. Положение промерных точек фиксируется засечками, как указано выше. Для упрощения, при нанесении промеров на план, кривые *AB*, *BC* и т. д. заменяются прямыми линиями, положение которых определяется точками *A*, *B*, *C*...; расстояния между последними измеряются на берегу. При облегченных исследованиях промеры по косым галсам делаются без засечек, отмечая лишь моменты промеров по секундомеру.

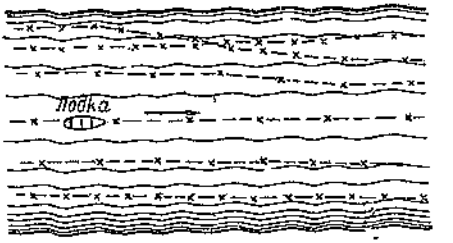


Рис. 165. Промеры по продольникам.

Промеры по *продольникам* заключаются в том, что лодка свободно плывет по течению и пускается несколько раз, чтобы осветить промерами всю ширину реки (рис. 165). Измерения глубин делаются через небольшие промежутки времени, отмечаемые по секундомеру; некоторые промерные точки засекаются угломерным инструментом, а по ним интерполируются на плане промежуточные точки. Неудобство этого способа состоит в том, что лодку после каждого продольного рейса приходится поднимать на веслах вверх по течению, что отнимает много времени. Зато этот способ удобно совмещать с определением направления струй, причем лодка служит поплавком.

Зимние промеры чрезвычайно удобно делаются со льда, для чего в нем в определенных точках пробиваются *лунки* (прорубн). При этом измеряется не только глубина воды, но и толщина льда и глубина его погружения (см. гл. V).

§ 45. Обработка данных промеров. По выполнении промеров производится их обработка. Прежде всего вычисляются средние из

нескольких промеров в одной точке и делаются исправления глубин, измеренных лотом, путем введения соответствующих поправок; затем по данным наблюдений на водомерном посту за время промеров все глубины приводятся к определенному горизонту воды (среднему или условному) при помощи прибавки или вычитания поправки, равной разности показаний водомерного поста в момент промеров и для принятого горизонта.

Поперечный профиль потока вычерчивается или по данным промеров в створе или на основании предварительно составленного по наложенным точкам плана в изобатах или горизонталях. Важно, чтобы профиль был доведен до горизонта самых высоких вод, для

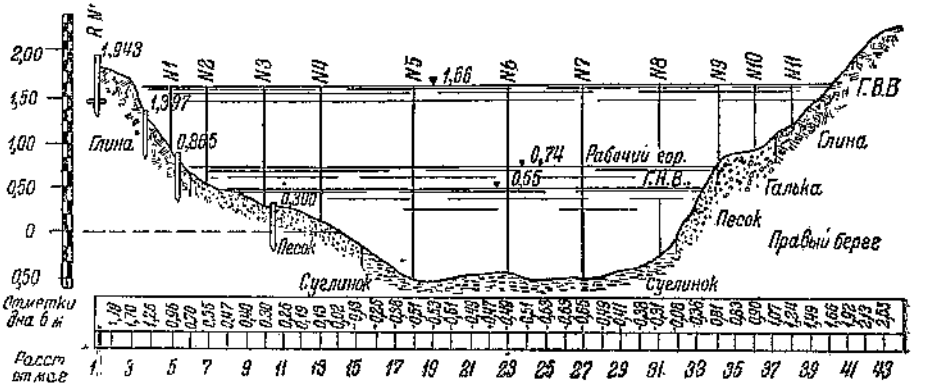


Рис. 166. Поперечный профиль по данным промеров.

чего часть сечения выше горизонта промеров вычерчивается на основании данных нивелировки.

Поперечные профили вычерчиваются в искаженных масштабах, обычно на миллиметровке. Удобные масштабы приведены в следующей табличке.

Горизонтальный масштаб		Вертикальный масштаб	
Полная ширина профиля	1 м в натуре	Полная высота профиля	1 м в натуре
до 7 м	5 см	до 2 м	10 см
7— 15 „	2 „	2— 4 „	5 „
15— 35 „	1 „	4—10 „	2 „
35— 70 „	5 мм	сверх 10 „	1 „
70—140 „	2,5 „		
140—350 „	1 „		
сверх 350 „	0,5 „		

На поперечном профиле кроме общих данных (река, место и дата промеров) показываются: горизонт воды, к которому отнесены промеры, отметки дна (или глубины), наивысший и наинизший горизонты, реперы, находящиеся в створе, а также расположение верти-

калей, предназначенных для измерения на них скоростей, и грунт дна (рис. 166).

Площадь поперечного сечения реки по такому профилю для любого горизонта легко может быть подсчитана или планиметрированием или аналитически, по способу трапеций. В последнем случае вычисления особенно упрощаются, если промерные точки располагаются на равных расстояниях друг от друга.

Обозначив это расстояние через S, расстояние от уреза левого берега до первой промерной точки $S_л$ и от последней точки до уреза правого берега $S_п$, а глубины через H, получим площадь поперечного сечения:

$$\Omega = \frac{H_1 S_л}{2} + \left(\frac{H_1}{2} + H_2 + H_3 + \ldots + H_{n-1} + \frac{H_n}{2}\right) S + \frac{H_n S_п}{2}. \quad (111)$$

В размываемом русле очертание поперечного сечения, а следовательно, и площади его при одинаковых горизонтах подвергаются постоянным изменениям. Для того, чтобы судить о размыве русла или о его занесении, принято вычислять среднюю отметку дна, т. е. среднее арифметическое отметок всех точек профиля дна. Такую отметку дно будет иметь, если площадь поперечного сечения превратить в равновеликий прямоугольник с шириной, равной ширине реки по профилю.

При различных горизонтах воды высота *среднего дна* будет также различна, если берега не отвесны. Чтобы она не зависела от отметки горизонта, для ее вычисления выбирается какой-либо постоянный уровень, например близкий к наивысшему, и по отношению к нему вычисляются отметки среднего дна при других горизонтах.

§ 46. Измерение расхода поплавками. Так как поплавки измеряют не действительную скорость в живом сечении, а среднюю на участке некоторого протяжения, которую можно считать приближающейся к скорости в створе лишь при условии параллельноструйного движения, то для определения расхода поплавками выбор прямолинейного участка с правильным призматическим руслом имеет, как уже отмечалось, чрезвычайно важное значение.

Такое же серьезное значение имеет установление направления рабочего створа, который должен давать сечение, приближающееся к живому сечению потока.

Наконец, как отмечалось еще раньше, при работе поплавками весьма существенную роль играет погода, а именно ветер; его отсутствие особенно важно для поверхностных поплавков, которые применяются в большинстве случаев предпочтительно перед другими.

Для измерения пути, проходимого поплавками, кроме основного рабочего створа, часто называемого *главным*, параллельно ему разбиваются еще два дополнительных створа на равных от него расстояниях, один выше, а другой ниже по течению — *верхний* и *нижний* створы (рис. 167) и выше верхнего створа, метров на 5—10, *пусковой* створ. С последнего выпускаются поплавки, которые, подойдя к верхнему створу, должны успеть принять скорость течения поверхностных струй.

Расстояние между верхним и нижним створами L определяется следующими соображениями. С одной стороны, желательно взять

его наименьшим, чтобы измеренная скорость приближалась к скорости в главном створе, с другой — неточности в определении длины пути поплавка и продолжительности его хода T будут влиять на результаты измерений тем больше, чем меньше это расстояние. Поэтому длину L приходится устанавливать с таким расчетом, чтобы она была наименьшей, но в то же время достаточной для обеспечения необходимой точности.

Скорость движения поплавка определяется по формуле (60):

$$v = \frac{L}{T}.$$

Считая, что величина L может быть определена весьма точно, а ошибка в определении скорости v зависит только от ошибки в величине T, рассуждениями, аналогичными приведенным в § 40, найдем:

$$L = -\frac{v^2}{dv} dT. \qquad (112)$$

Чтобы определить скорость v с точностью до 2%, примем dT по секундомеру равным 0,5 секунды (включая неточность в определении моментов прохода поплавков через створы). Тогда $dv = 0{,}02\ v$, и из формулы (112):

$$L = |25\ v.|$$

При работе с карманными часами можно принять dT около 2 секунд. Для определения в этом случае скорости с точностью до 5% получим минимальное расстояние между створами:

$$L = |40\ v|.$$

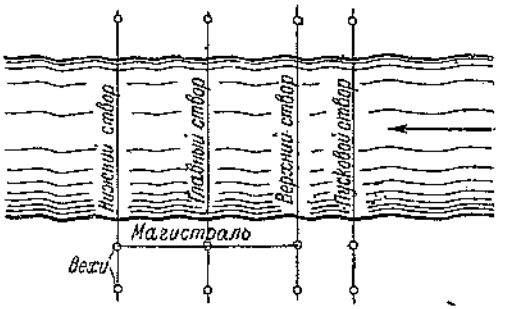


Рис. 167. Створы для поплавков.

Таким образом, при работе с секундомером расстояние между верхним и нижним створами должно быть таково, чтобы продолжительность хода поплавков была *не менее 25 секунд*. Отступать от этого требования часто приходится на небольших речках и ручьях, где трудно найти участок необходимой длины с однообразным профилем. Там приходится уменьшать расстояние между створами иногда до 4—5 *м*, а у горных речек вдобавок и расчищать русло.

Так как по ширине реки величина скорости меняется, то, согласно полученным формулам, пришлось бы менять и расстояние между створами для разных поплавков; точно также скорости меняются и при разных положениях горизонта воды. На практике принято для упрощения устройство только двух постоянных дополнительных створов, причем за скорость v при определении расстояния L берется *наибольшая* поверхностная скорость. Иногда для высоких горизонтов половодья и паводков устраиваются специальные створы. Весьма полезны особые створы для прибрежных поплавков, потому что эти поплавки обычно дают наихудшие результаты: они или увлекаются

течением к середине потока и дают преувеличенные скорости, или задерживаются у неровностей берега и попадают в водовороты.

Когда створы разбиты и обозначены, производятся промеры глубин по трем створам: главному и двум дополнительным.

Техника работ по измерению скоростей зависит, главным образом, от ширины реки. На реках шириной примерно до 50 *м* удобнее всего по всем трем створам протянуть размеченные тросы, проволоки или просмоленные веревки, возможно ближе над водой, со свешивающимися значками, которые служат и для промеров глубин и для определения места прохода поплавков через створ. Нулевые метки тросов совмещаются с прочными реперными кольями, расположенными на магистрали. Часто ограничиваются натягиванием троса или бечевы только на одном главном створе, где и определяются точки пересечения его поплавками. В этом случае наблюдатель с секундомером помещается несколько ниже главного створа, чтобы замечать места прохода поплавков под тросом или бечевой.

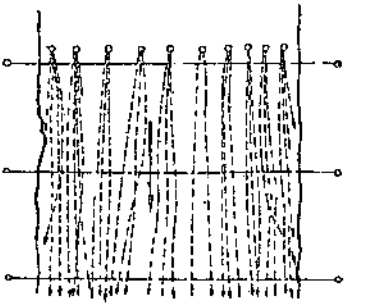


Рис. 168. Пути поплавков.

Поплавки забрасываются с берега или выпускаются с лодки в пусковом створе. Один или несколько наблюдателей следят за их проходом через каждый створ, подавая сигналы (звуковые или флажком) наблюдателю с секундомером, который при проходе поплавка через верхний створ пускает секундомер, а при проходе через нижний останавливает его. Сигналов подается два: 1) предупредительный и 2) в момент прохода поплавка через створ.

Так как на движение поплавков влияют разнообразные факторы, как-то: скорость и направление ветра, пульсация, форма, вес и глубина погружения поплавка и пр., то в каждой точке желательно выпускать по несколько поплавков (не менее 2—3), с тем, чтобы общее число их было не менее 15—30 и точки выпуска поплавков распределялись бы равномерно по ширине реки.

Поплавки, выпущенные из одной точки, обычно пересекают створы в разных местах (рис. 168): можно определять среднее арифметическое расстояние точек их прохода по тросу и этой средней точке приписывать среднее значение из скоростей.

Нередко пути поплавков пересекаются, и поэтому на практике принято всю ширину реки по створу делить на несколько частей (5—20), сообразуясь с очертанием профиля и распределением скоростей. Для каждой части определяется средняя продолжительность хода всех поплавков, попавших в ее пределы, и по ней — средняя поверхностная скорость, которая приписывается средней же точке прохода поплавков, причем продолжительность хода отдельных поплавков не должна отличаться от средней больше, чем на 10%.

На малых реках с быстрым течением (на горных речках), шириной до 20 *м*, нередко определяется лишь наибольшая поверхностная скорость. Пускается 10—15 поплавков, забрасываемых на середину речки, и из них выбирают два с наименьшей продолжительностью

хода и разницей, не превосходящей 10%. Наибольшая поверхностная скорость вычисляется по средней продолжительности их хода.

На широких реках натягивание троса затруднительно, кроме того трос дает сильный провес, а бечева растягивается. Помимо этого, при большой ширине реки становится трудно отсчитывать по тросу места прохода поплавков (приходится наблюдать в бинокль). Поэтому они определяются двумя путями: 1) засечками угломерным инструментом и 2) при помощи косых створов.

Для более точного наблюдения над проходом поплавков через створы парные вехи, у которых стоят наблюдатели, должны быть установлены строго вертикально и в расстоянии одна от другой не меньшем, чем $^1/_{10}$ ширины реки. Иногда вехи снабжаются приспособле-

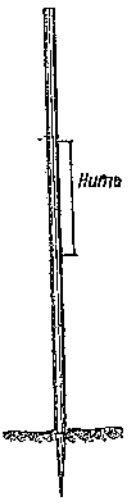


Рис. 169.
Веха с нитью.

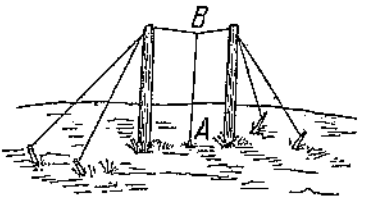


Рис. 170. Створный знак.

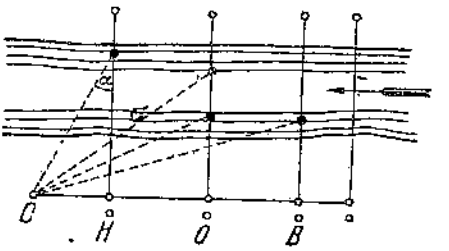


Рис. 171. Засечки поплавков угломерным инструментом.

нниями для визирования, наподобие изображенного на рис. 169. На Камско-Иртышских водных изысканиях (1911—12 гг.) применялись особые створные знаки, где веха заменена вертикально натянутой проволокой AB (рис. 170). В некоторых случаях в створе для наблюдений за прохождением поплавков ставится угломерный инструмент (теодолит, пантометр), труба которого вращается в плоскости створного сечения. Такой способ сильно усложняет работу, неудобен и поэтому редко применяется.

Засечки поплавков угломерным инструментом делаются в общем так же, как и при промерах (§ 44), только магистраль продолжается вверх или вниз от крайнего створа на такое расстояние, чтобы на ближайшем створе углы засечек были не менее 30° (рис. 171). При инструменте находятся два наблюдателя: один следит в трубу за ходом поплавков, другой — за сигналами, подаваемыми при прохождении поплавков через створы, и секундомером. Второй наблюдатель указывает первому моменты, когда нужно делать засечки.

Скорости хода поплавков вычисляются по предыдущему. Для определения мест пересечения поплавками створов вычерчивается в достаточно крупном масштабе схема расположения створов, магистрали и угломерного инструмента и по транспортиру откладываются измеренные углы между магистралью и направлениями визирования отдельных поплавков, которыми и определяются искомые точки.

Угломерный инструмент может быть заменен *косыми створами*, которые разбиваются при помощи вех или на одном, или на двух берегах.

В первом случае (рис. 172) магистраль продолжается до точки *M*, на полную длину или больше, а на другом берегу разбивается дополнительная магистраль *B'K*. На последней через равные промежутки забиваются пронумерованные колышки в количестве, соответствующем желательному числу засечек поплавков. При пуске каждого поплавка веха ставится на соответствующий колышек. По магистрали *MH*, обозначенной на земле бечевой или бороздой, с вехой передви-

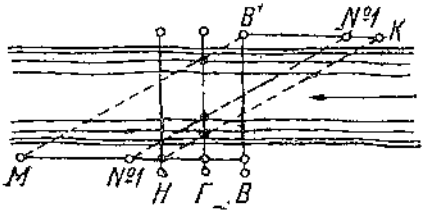


Рис. 172. Засечки косыми створами (1-й способ).

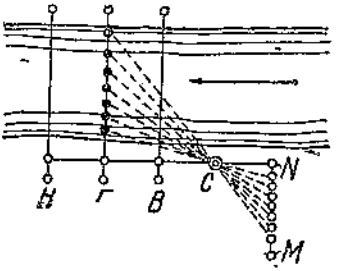


Рис. 173. Засечки косыми створами (2-й способ).

гается рабочий, который ловит поплавок в створ вехи другого берега и своей и устанавливает веху по сигналу наблюдателя, следящего за прохождением поплавка через главный створ. После этого вместо вехи забивается колышек с тем же номером, что и на другом берегу, и производится засечка следующего поплавка и т. д.

Во втором случае (рис. 173) магистраль продолжается на полную длину или больше, и посередине этого дополнительного участка устанавливается центральная неподвижная веха *C*. Затем перпендикулярно к *CN* из точки *N* разбивается прямая линия *NM*, обозначенная на земле, как и в предыдущем способе. Точки прохода поплавков через главный створ по сигналу засекаются передвижной вехой по этой линии, ориентируясь на поплавок и центральную веху. Затем веха заменяется колышком и т. д.

Если определяются точки пересечения поплавками всех трех створов, то могут применяться схемы, показанные на рис. 174 и 175, легко понятные после всего сказанного.

По окончании работ составляется схематический план, как и при работе с засечками угломерным инструментом.

Все описанные способы производства работ применимы в общем не только для поверхностных поплавков, но и для глубинных и для гидрометрических шестов. Несколько отличается измерение скоростей поплавками-интеграторами, как ясно из их описания (§ 22). В этом

случае можно обойтись двумя створами — главным и нижним. Измерение скоростей производится на определенных вертикалях, размещаемых более или менее равномерно по ширине реки. Число вертикалей желательно взять не менее 5, а при ширине реки в пределах 10—50 *м* — около 8—10. На каждой вертикали пускается от двух до пяти поплавков, а за расчетную величину сноса принимается среднее из всех надежно сделанных отсчетов.

При всех работах с поплавками параллельно с определением скоростей ведутся наблюдения над уровнем воды. Если последний за время работ изменился не больше, чем на 2 *см*, то измерения относятся к среднему уровню из наблюденных. При более значительных колебаниях уровня определение скоростей рекомендуется повторить, следя за тем, чтобы вся работа закончилась возможно скорее и при

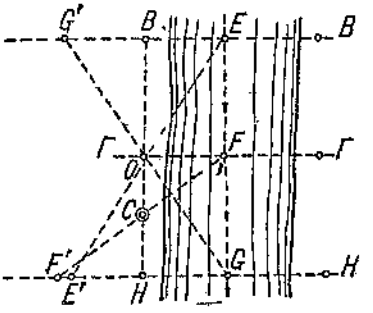


Рис. 174. Засечки косыми створами (3-й способ).

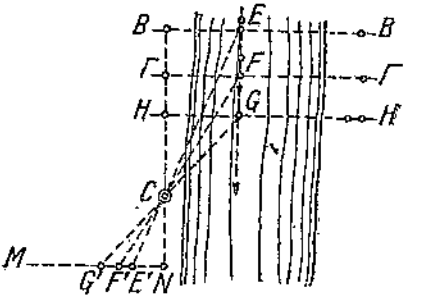


Рис. 175. Засечки косыми створами (4-й способ).

колебаниях уровня не больше 2 *см*, или же приходится при вычислении расхода определять условный средний уровень особыми приемами (см. § 51).

Пример записи измерений приведен в приложении 5.

§ 47. Вычисление расходов, измеренных поплавками. В том случае, когда определена лишь одна наибольшая поверхностная скорость потока v_{om}, расход вычисляется по формуле (110):

$$Q = \omega V,$$

где ω есть площадь живого сечения потока, а V — средняя для всего живого сечения скорость ($V = \frac{Q}{\omega}$). Зависимость последней от наибольшей поверхностной скорости v_{om} или коэфициент K_1 в выражении

$$V = K_1 v_{om} \qquad (113)$$

определяется эмпирическими формулами. [1]

---

[1] Например, по формуле *Лямбейра*

$$V = 0{,}75\ v_{om}; \qquad (114)$$

по *Вагнеру*

$$V = 0{,}705\ v_{om} + 0{,}001\ v^2_{om}. \qquad (115)$$

Иногда применяется формула *Прони* (45).

Из них лучшие результаты дает формула *Базена:*

$$K_1 = \frac{C}{C+14}, \tag{116}$$

где C — коэфициент *Шези.*

Определяя последний по *Базену:*

$$C = \frac{87}{1+\frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \tag{117}$$

(R — гидравлический радиус, равный $\frac{\omega}{\chi}$, где χ — смоченный периметр), найдем:

1) для «земляных стенок в обычном состоянии» ($\gamma = 1{,}30$)

$$K_1' = \frac{4{,}8}{5{,}55+\frac{1}{\sqrt{R}}}; \tag{118}$$

2) для «земляных русел, оказывающих особенно сильное сопротивление» — значительно заросших, при скалистом с валунами или крупногалечном дне и пр. ($\gamma = 1{,}75$),

$$K_1'' = \frac{3{,}55}{4{,}1+\frac{1}{\sqrt{R}}}. \tag{119}$$

В пределах значений гидравлического радиуса от 0,25 до 4,0 *м* эти формулы дают:

K_1' от 0,63 до 0,79,
K_1'' от 0,58 до 0,77.

Площадь живого сечения ω, входящая в формулу (110), находится как среднее из двух средних площадей на участках между главными и дополнительными створами:

$$\omega = \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_в+\omega_г}{2}+\frac{\omega_г+\omega_н}{2}\right) = \frac{\omega_в+2\omega_г+\omega_н}{4}, \tag{120}$$

где значки при ω соответствуют верхнему, главному и нижнему створам.

Если скорости определялись поверхностными поплавками по всей ширине реки, то расход вычисляется следующим образом.

Вычерчивается профиль живого сечения по главному створу (рис. 176 и приложение 5), приведенный к среднему уровню, имевшему место при измерении скоростей. Над линией горизонта воды отмечаются места прохода поплавков и номер каждого поплавка. Под профилем выписываются: глубины по данным промеров (приведенные к горизонту воды) и расстояния от репера или магистрали до: а) промерных точек, б) точек прохода поплавков и в) скоростных вертикалей (последние отмечены жирными линиями).

Для получения мест скоростных вертикалей поплавки разбиваются на ряд групп (на рис. 176 число групп 14, в каждую входит от 1 до 5 поплавков), как указывалось в предыдущем параграфе, и для каждой группы вычисляется среднее расстояние от репера, которое и определяет положение скоростной вертикали.

Глубины вертикалей берутся по профилю или вычисляются путем интерполяции по глубинам соседних промерных вертикалей, а ре-

зультаты вписываются в бланк для вычислений (см. приложение 5). Скоростными вертикалями профиль делится на некоторое число частей (в данном случае XV интервалов), для каждой из которых в бланке подсчитывается ее площадь (по формуле трапеций), средняя продолжительность хода поплавков и соответствующая ей поверхностная скорость (расстояние между крайними створами в данном случае $L = 40$ м). Сумма вычисленных площадей дает полную площадь живого сечения.

Средние скорости для каждого интервала вычисляются как полусуммы скоростей на ограничивающих интервал скоростных верти-

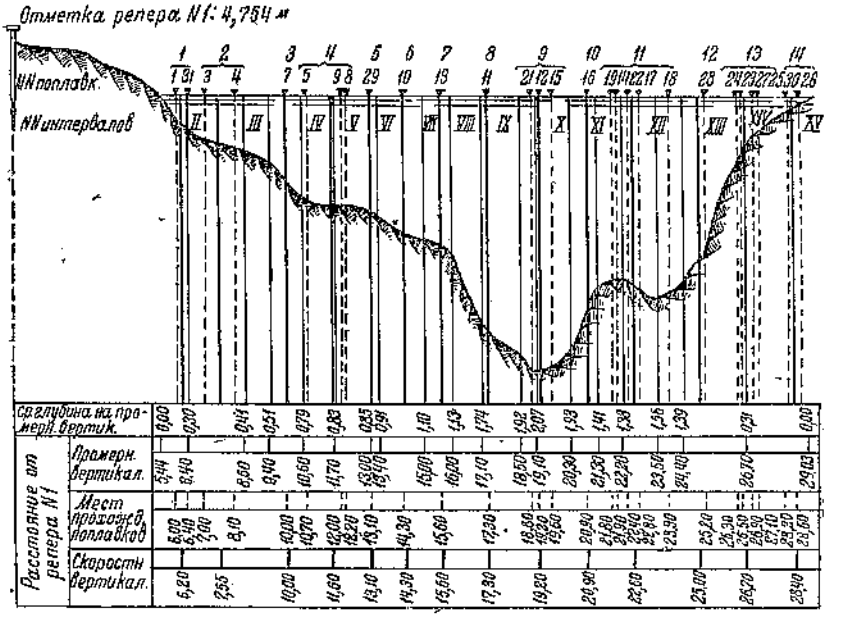


Рис. 176. Определение мест скоростных вертикалей.

калях. Умножая площади между скоростными вертикалями на полученные таким образом скорости, находим *частичные фиктивные расходы* для каждого интервала. Они называются фиктивными потому, что получены умножением площади на поверхностную, а не на действительную среднюю для рассматриваемой части живого сечения скорость.

Истинные расходы должны быть меньше фиктивных, будучи связаны с ними для малых интервалов тем же переходным коэфициентом k, который входит в формулу (43):

$$v_v = k \cdot v_0.$$

Сумма фиктивных расходов для всего сечения дает полный фиктивный расход потока Q', а действительный его расход Q равен:

$$Q = K'Q'. \qquad (121)$$

Величина коэфициента K', так же как и k для отдельных вертикалей, зависит от разных местных обстоятельств и от высоты горизонта воды. Ее зависимость от последнего для данного живого сечения может быть установлена из уравнения (121), лишь измерив расход более точным образом (например, вертушкой). Сделав это при разных горизонтах, можно построить кривую:

$$K' = f(H),$$

которой и пользоваться для поплавочных измерений.

Однако обычно, если есть вертушка, то не приходится прибегать к поплавкам; если же расходы при наличии вертушки измеряются поплавками, то потому, что вертушка в данных условиях большей частью неприменима (при очень высоком стоянии горизонта, при ледоходе, при малых скоростях, не улавливаемых вертушкой). Поэтому чаще всего приходится пользоваться приближенным значением коэфициента K', который берется равным $\sim 0{,}9$.[1]

Чаще расход, измеренный поверхностными поплавками, вычисляется графическим методом *Гарляхера* путем построения эпюр поверхностных скоростей и фиктивных элементарных расходов.

Для этого над профилем живого сечения от линии горизонта воды откладываются вверх в соответственных точках в некотором масштабе скорости, через концы которых и проводится кривая, представляющая эпюру поверхностных скоростей (на рис. 177 профиль живого сечения не показан; он тот же, что и на рис. 176). Так как точки разбрасываются, то кривая проводится через центры тяжести отдельных групп точек. Затем вычисляются фиктивные элементарные расходы, как произведения из глубин на соответствующие скорости ($v_0 H$) для всех промерных точек, беря величины скоростей из эпюры. Откладывая и их вверх, получаем эпюру фиктивных элементарных расходов.

---

[1] Этот коэфициент связали с коэфициентом k формулы (43), выражающим отношение средней скорости по вертикали к поверхностной, следующим образом:

$$K' = \frac{Q}{Q_1} = \frac{\int_0^B v_0 H dl}{\int_0^B v_0 H dl} = \frac{\int_0^B k v_0 H dl}{\int_0^B v_0 H dl}, \qquad (122)$$

где значение k переменно по ширине реки.

От коэфициента K' следует отличать коэфициент K_1 в формуле (113), а также коэфициент, выражающий отношение средней для всего сечения скорости V к средней поверхностной скорости V_0:

$$K'' = \frac{V}{V_0}. \qquad (123)$$

Последняя может быть получена из эпюры поверхностных скоростей (рис. 177) путем деления ее площади на ширину потока.

Исследования на Дунае при колебаниях уровня в 2,73 *м* дали для K' значения в пределах 0,897—0,920, тогда как соответствующие значения K'' колебались от 0,972 до 1,325, т. е. гораздо шире.

Остается определить площадь, ограниченную ею и линией горизонта воды, путем вычисления или планиметрирования. Она равна величине фиктивного расхода Q':

$$\int_0^B v_0 H dl = \int_0^B v_0 d\omega = \int_0^B dQ' = Q',$$

так как $Hdl = d\omega$ представляет вертикальную полоску живого сечения шириной dl (рис. 147), а $v_0 d\omega = dQ'$ — фиктивный расход через эту полоску в предположении, что средняя скорость для полоски равна поверхностной.

Иногда при вычислении расхода строится только эпюра поверхностных скоростей (рис. 177), по которой берутся скорости, соот-

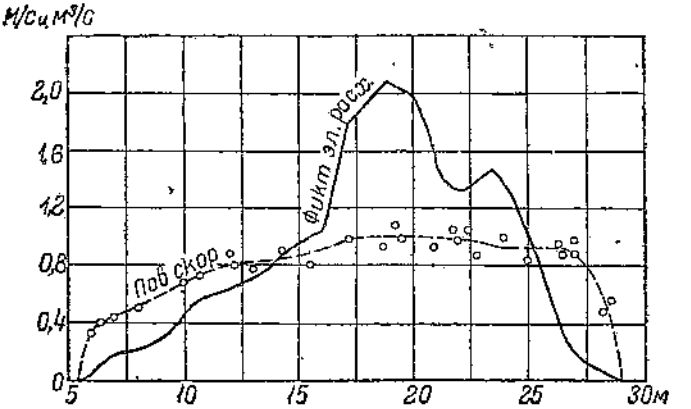


Рис. 177. Эпюры поверхностных скоростей и фиктивных элементарных расходов.

ветствующие промерным вертикалям, и вписываются в бланк вычислений. Далее подсчет производится, как в приложении 5.

Во всех случаях, когда скорости определялись по всей ширине реки, делается поверка, насколько введенная в вычисления площадь живого сечения по главному створу согласуется с подсчитанной по формуле (120). Разница не должна превосходить 4%, в противном случае это обстоятельство должно быть особо оговорено.

При тщательном выполнении работ и благоприятных условиях можно считать, что расходы, вычисленные для небольших и быстрых речек, даже по одной максимальной поверхностной скорости, отличаются от действительных не более, чем на 10—15% . Точность определения расходов поверхностными поплавками вообще лежит в пределах 8—15%.

Вычисление расходов, измеренных при помощи гидрометрических шестов и поплавков-интеграторов, ясно после всего вышесказанного. Так как эти приборы дают величину средней скорости по вертикали, то мы получаем теми же приемами не фиктивные, а действительные величины как частичных расходов (между скоростными вертикалями), так и полного расхода потока. Точность определения расходов при

этом может быть оценена в 5—8% (поплавки-интеграторы дают, вообще говоря, более высокую точность, нежели шесты).

Применение глубинных поплавков в настоящее время редко имеет место, и так как эти приборы измеряют скорости на определенных глубинах, которые можно приписать отдельным точкам вертикалей, то и производство измерений и методы обработки их должны быть комбинированными из применяемых к поплавкам и приборам, позволяющим измерять скорости в отдельных точках по вертикали (вертушкам, батометрам, трубкам *Пито*).

Профильные поплавки, описанные в § 24 (ширма *Андерсона*, солевой экран) и применимые лишь в особых условиях, дают непосред-



Рис. 178. Мостик на козлах.

ственно величину средней скорости в живом сечении. Для получения расхода остается ее умножить на соответствующую площадь. Здесь может быть получена исключительно высокая точность определения расхода (порядка 1%).

§ 48. Оборудование створа и измерение расхода вертушкой. На неглубоких речках вертушка на легкой штанге может устанавливаться рабочим, стоящим в воде и держащим перед собой штангу. Во всех прочих условиях для установки приборов требуются специальные приспособления, которые можно подразделить следующим образом:

1) мостики — балочные и подвесные,
2) лодки,
3) подвесные люльки,
4) паромы,
5) приспособления для работ со льда.

На нешироких канавках и ручьях мостиком может служить простая доска, а при ширине речки 10—12 *м* — два-три бревна. На более широких речках возможны разборные мостики на переносных козлах, которые переставляются по ширине реки (рис. 178), или несложные балочные и шпренгельные (рис. 179) конструкции. Промежуточные опоры, если их приходится устраивать, лучше делать из толстых до-

сок, поставленных узким ребром против течения, чтобы меньше стеснять последнее.

На реках с быстрым течением и глубоких, шириной примерно до 50 *м*, на постоянных створах удобно устраивать *подвесные мостики* на стальных тросах. Например, на рис. 180 изображен мостик, под-



Рис. 179. Шпренгельный мостик.

вешенный на двух парах оцинкованных тросов. На нижних тросах лежат поперечные деревянные бруски, по которым проложен дощатый настил. Верхние и нижние тросы в местах, где положены бруски, соединяются подвесками и опираются на береговые опорные рамы.



Рис. 180. Подвесной мостик.

Концы тросов запущены в землю, где и закреплены (при помощи деревянных перекладин, камней или свай).

Лодки применяются на не особенно больших реках. При тихом течении лодка удерживается на месте за створный трос; чтобы она не «рыскала» и трос не очень вытягивался, полезно на корме иметь опытного рабочего, удерживающего лодку неподвижно при помощи шестов, упираемых в дно. При быстром течении и больших глубинах лодка может удерживаться специальным вторым тросом, натянутым параллельно створному, в расстоянии от него, равном длине лодки, или двумя оттяжками, концы которых закреплены на обоих берегах. Отпуская один конец оттяжки и выбирая другой, лодку передвигают вдоль створа. Наконец, возможно применение якоря, забрасываемого с кормы. С лодки удобно работать вертушкой на тросе, опускаемой через блок с выноса, устроенного на носу (рис. 181).

Подвесные люльки, передвигающиеся по тросу, удобны на реках с высокими крутыми берегами и быстрым течением. В люльке могут

помещаться один или два наблюдателя с приборами, а сама люлька передвигается по тросу или самим наблюдателем или с берега. Вертушки применяются главным образом тросовые.

На рис. 182 показана типичная американская люлька, на рис. 183 — схема подобного устройства, применяемого в Средней Азии, а на рис. 184 — измерение расхода с более сложной люльки. *Альбрехтом* было предложено аналогичное устройство для одной вертушки на тросе, без наблюдателя (см. рис. 105), которая управляется с берега при помощи блоков и тросов. Трос, опоры и все приспособления в этом случае могут иметь гораздо меньшие размеры, зато вертушка чаще подвергается опасностям.

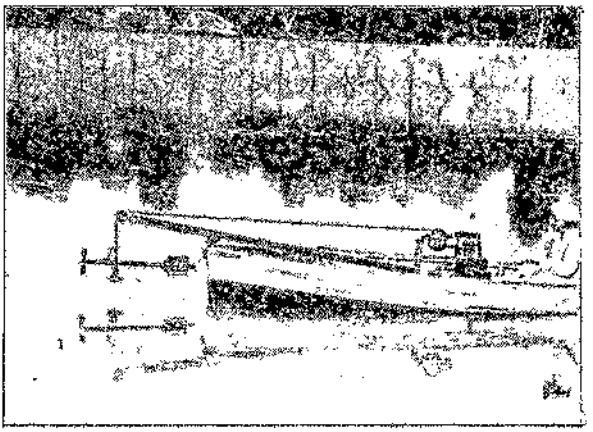


Рис. 181. Измерение расхода с лодки.

Если обозначить горизонтальное расстояние между опорами троса через l, его провес (вертикальное расстояние от наинизшей точки троса до линии, соединяющей опоры) через f, вес троса через q и вес сосредоточенного груза (люльки с наблюдателем и вертушкой) через Q, то растягивающее трос усилие T можно вычислить по формуле:

$$T = \frac{Q + 0{,}5q}{4} \cdot \frac{l}{f}. \qquad (124)$$

Оно ни в каком случае не должно превосходить ¼ разрывающего усилия.

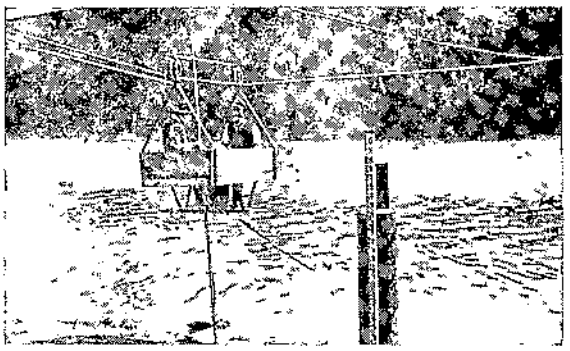


Рис. 182. Американская люлька.

На широких и глубоких реках измерения делаются с *паромов*, представляющих две лодки, соединенных дощатым помостом (рис. 185). Между лодками оставляется некоторое расстояние, обеспечивающее устойчивость их и удобство работы вертушкою. Иногда вместо лодок употребляются цилиндрические металлические поплавки, и тогда все устройство называется *понтоном*. При работе с паромом предпочтение отдается вертушке на штанге — упорной или подвесной.

Вертушка может погружаться в воду: 1) с носовой части парома, для чего помост выдвигается вверх по течению и расстояние между лодками берется возможно большее, во избежание образования подпора от лодок, 2) между лодками, для чего последние необходимо также раздвигать как можно шире, и 3) с наружных бортов, для чего

настил выносится в сторону, а расстояние между лодками может быть взято меньше. Удобнее всего, а поэтому и чаще всего применяется установка вертушки между лодками.

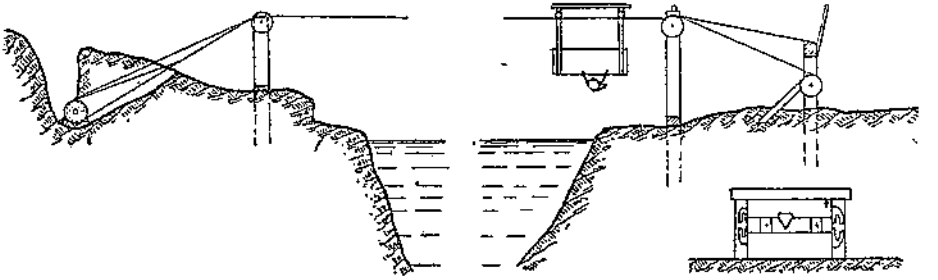


Рис. 183. Лодка среднеазиатского типа.

Перемещение парома по ширине реки осуществляется или по створному тросу или при помощи системы якорей. В первом случае оно может производиться вручную или по принципу «самолета»: если скорости течения достаточно велики, то стоит повернуть паром при помощи рулей или вручную так, чтобы он стал наискось течению, как он начинает двигаться, скользя по одному из блоков. На нешироких реках с медленным течением можно перекинуть через реку два троса, по которым и передвигается паром (рис. 186), или вместо второго троса закидывать два якоря (рис. 187); для завозки и поднятия якорей необходима особая лодка.

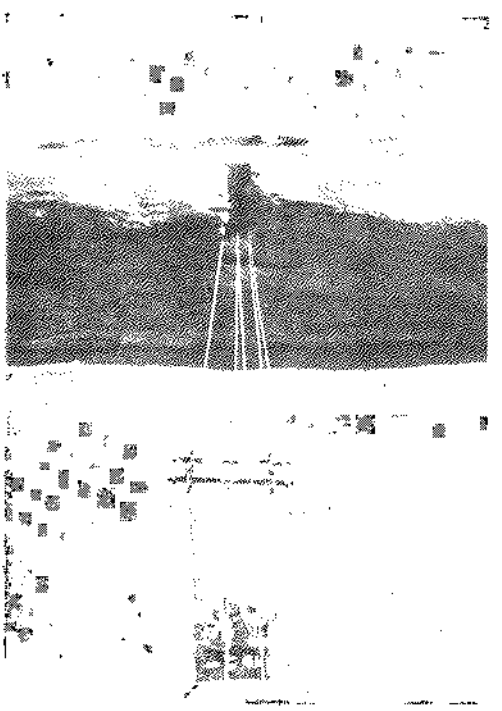


Рис. 184. Измерение расхода с лодки на р. Зеравшан.

На широких реках, где нет возможности натянуть трос, приходится устанавливать паром на якорях. При этом применяются два способа. Можно выше створа по течению забрасывать якорь, удерживая паром на длинном тросе и закрепляя его двумя или четырьмя боковыми якорями (рис. 188). Передний якорь (или постоянный буек) может служить для установки парома на нескольких вертикалях. Иначе — можно закреплять паром только четырьмя боковыми якорями, вынося переднюю пару якорей несколько выше по течению. Эти способы установки парома занимают много времени и тре-

буют опытного обслуживающего персонала, но являются единственно возможными на таких реках, как, например, Волга в среднем и ниж-

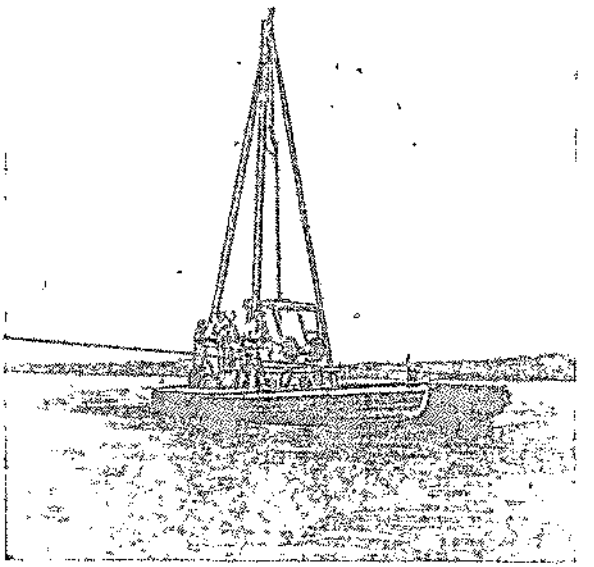


Рис. 185. Паром.

нем течении, где ее ширина достигает нескольких километров. Для завозки якорей и перестановки парома здесь приходится применять

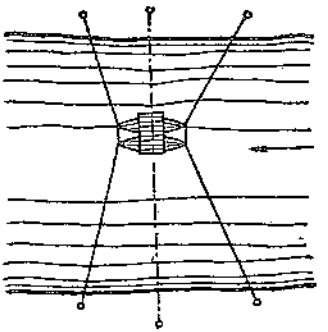


Рис. 186. Установка парома на двух тросах.

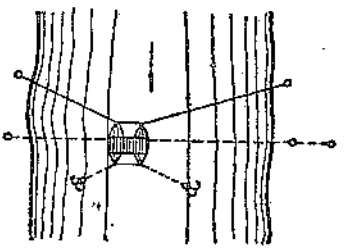


Рис. 187. Установка парома на одном тросе и якорях.

пароходы. При этом нередко в одном створном сечении работы ведутся одновременно двумя и более паромами или же не прерываются и ночью.

Во всех случаях, когда паром или лодка передвигаются по тросу, желательно иметь особый разметочный трос для точной установки на

вертикали. Этот трос, не неся никакой нагрузки, кроме собственного веса, может быть взят сравнительно тонким и легким. Если вместо троса взята бечева, то она размечается в натянутом состоянии, для троса же можно учесть наперед его удлинение.

Ошибка в расстояниях вследствие провеса троса может быть подсчитана таким образом. Если принять кривую линию троса (цепная линия) для упрощения за дугу круга, то превышение ее длины по сравнению с длиной хорды l, в зависимости от величины провеса посередине f, составит:

$$\Delta l = \frac{8f^2}{3l}.$$

Если требуется измерять расстояния с точностью n %, то

$$\frac{nl}{100} = \frac{8f^2}{3l},$$

и допускаемая величина провеса равна:

$$f = 0{,}06 \cdot l\sqrt{n} \qquad (125)$$

(например, при точности в 0,1% и $l = 200$ *м*, $f = 3{,}8$ *м*).

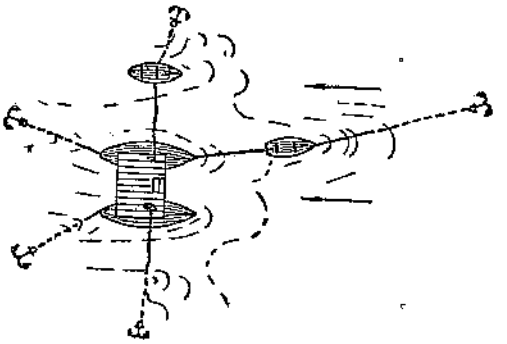


Рис. 188. Установка парома на якорях.

Если ширина реки не позволяет перетянуть трос, то установка парома на вертикали делается при посредстве угломерного инструмента или косых створов, точно так же, как и при определении мест



Рис. 189. Зимняя будка Свирьстроя.

прохода поплавков через створы, с той лишь разницей, что при назначении наперед постоянных вертикалей углы могут быть вычислены заранее, а вехи сразу расставлены в надлежащих местах.

При измерении расхода со льда измерение расстояний и установка вертушки на вертикали чрезвычайно упрощаются. На постоянных гидрометрических станциях для обеспечения спокойной и удобной работы нередко устраиваются *будки-теплушки* (рис. 189), передвигаю-

щиеся на полозьях, с отверстием в полу для опускания вертушки в прорубь. Прорубь рекомендуется придавать в плане продолговатое очертание, суживающееся вверх по течению, с тем, чтобы вертушка заводилась в щель, под которой на распределении скоростей меньше сказывается влияние широкого отверстия во льду.

Выбор *числа* и *мест расположения скоростных вертикалей* делают, руководствуясь шириной реки и очертанием поперечного профиля в створе, на основании данных промеров глубин.

С увеличением числа вертикалей повышается точность определения расхода, но увеличивается и потребное для измерений время. Обычно число вертикалей назначается такое, чтобы измерение расхода можно было закончить в один день; в противном случае следует применять несколько вертушек для одновременной работы на разных вертикалях.

Приближенно можно принять такое соотношение между шириной реки B, наименьшим числом вертикалей N и средним расстоянием между ними b:

B м	N	b м
2— 10	5	0,25— 1,5
10— 20	8	1,0 — 2,0
20—200	10	2,0 —20,0
200—500	12	15,0 —40,0
свыше 500	15	30,0 —60,0

Если русло в поперечном профиле имеет правильную форму и плавную линию дна, то вертикали удобно распределить через равные расстояния. Если линия дна резко ломается, их следует располагать в точках переломов, так как в этих местах изменяются и скорости. У берегов вертикали рекомендуется назначать чаще, придвигая крайние вертикали к урезам настолько, насколько это позволяют удобства работы и чувствительность вертушки.

Вертикали нумеруются по порядку (от одного берега к другому), и на гидрометрических створах их положение фиксируется и остается неизменным.

Измерение расхода рекомендуется производить в тихую погоду с утра. Скорости измеряются на каждой вертикали одним из методов, изложенных в предыдущей главе. При большой ширине реки и большом числе вертикалей, или если уровень быстро меняется (или в зависимости от других обстоятельств), вместо основного пятиточечного метода работа ведется трех, двух- или одноточечным способом или интеграционным методом.

Результаты измерений записываются в журнал, для которого существует довольно много форм. Одна из них приведена в приложении 6. Прежде всего записываются данные общего характера: место производства работ и время определения расхода, показания водомерного поста (в начале и в конце работ), обстановка работ (вертушка, ее тип, номер и способ опускания, время последней тарировки, метод измерения скоростей), число вертикалей. Затем на каждой вертикали запись ведется отдельно: отмечается номер и положение вертикали, время начала и окончания измерений, показания водомерного поста, глубина вертикали, состояние погоды и, наконец,

результаты наблюдений над работой вертушки в отдельных точках (числа оборотов, показания секундомера и скорости течения). В журнале же отводится место для обработки расхода и записи конечных результатов.

На современных низконапорных гидроэлектрических станциях для измерения расходов воды, поступающей к турбинам (при приемных испытаниях), устраиваются специальные опускные рамы с одним или несколькими горизонтальными рядами закрепленных вертушек (рис. 190). Одновременная запись работы всех вертушек производится на хронографе. Для точного определения расхода берется весьма значительное число точек измерения скоростей в сечении. Так, например, по швейцарским нормам число точек N должно быть:

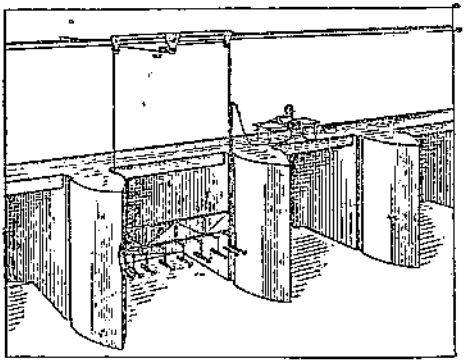


Рис. 190. Рама с вертушками на гидроэлектрической станции.

$$14\sqrt{\Omega} \leqslant N \leqslant 25\sqrt{\Omega}$$

(Ω — площадь живого сечения в $м^2$).

§ 49. Методы вычисления расхода. Вычисление расхода по средним скоростям на вертикалях. В соответствии с тремя направлениями сечений модели расхода (см. § 41), можно указать три основных метода вычисления ее объема, т. е. расхода потока:

1) по эпюрам скоростей на вертикалях,

2) по изотахам,

3) по эпюрам скоростей на разных глубинах.

Первый метод является наиболее распространенным. Он основан на том, что вертикальными плоскостями, перпендикулярными к поперечному сечению, модель расхода (рис. 191) делится на ряд элементов-пластинок $CEFG$ толщиной b. Объем одной пластинки, или частичный расход q, может быть вычислен по формуле:

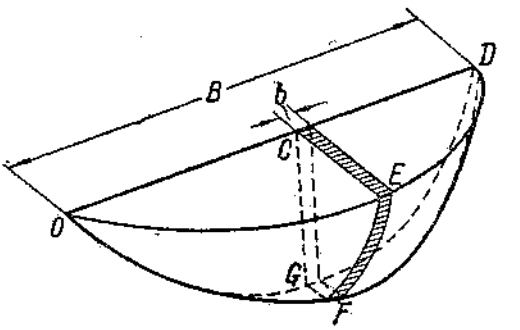


Рис. 191. К вычислению расхода по средним скоростям на вертикалях.

$$q = \frac{\Omega_v' + \Omega_v''}{2} b, \qquad (126)$$

где величины Ω_v суть площади параллельных оснований пластинки, представляющих эпюры распределения скоростей по вертикалям. Эти площади суть в то же время «элементарные расходы» на опреде-

ляющих толщину пластинки вертикалях и равны произведению средней скорости на вертикали на глубину ($v_v H$).

Объем модели расхода, или расход потока, равен:

$$Q = \sum q. \tag{127}$$

При бесконечно-малых расстояниях между вертикалями $b = dl$ мы имели бы вместо (126):

$$dQ = \Omega_v dl = v_v H dl$$

и вместо (127):

$$Q = \int_0^B v_v H dl.$$

(Напомним, что v_v есть проекция средней скорости по вертикали на нормаль к взятому поперечному сечению, или действительная средняя скорость, если взятое сечение можно считать за живое сечение, — см. § 41).

Когда скорости измерены на нескольких вертикалях, то вычисление расхода может быть сделано по формулам (126) и (127), принимая за частичные расходы части объема модели расхода, заключенные между плоскостями эпюр скоростей. Число таких частей будет на единицу больше, чем число вертикалей. Объемы крайних частей (между урезами воды и ближайшими вертикалями) могут быть приближенно подсчитаны по той же формуле (126), полагая величины Ω_v для точек урезов равными нулю. Понятно, что точность определения расхода этим методом будет тем больше, чем на большем числе вертикалей измерены скорости и чем правильнее вертикали распределены по ширине потока, т. е. расставлены в характерных точках перелома линии дна на поперечном профиле.

Применяя изложенный метод, расход можно определить или, как говорят, обработать чисто вычислительным, т. е. аналитическим путем, не прибегая к построению эпюр скоростей, а вычисляя средние скорости на вертикалях по одной из формул, приведенных в § 19 (если скорости измерены в соответствующих точках), и затем используя формулы (126) и (127).[1]

Но можно применить и *графический способ*, о котором уже дано понятие в §§ 43 и 47, а именно, определив тем или иным путем средние скорости на вертикалях v_v (по формулам или из эпюр — рис. 41), построить эпюру элементарных расходов по ширине потока и определить ее площадь, выражаемую уравнением (108), которая и представляет искомый расход. Этот метод точнее чисто-аналитического, так как эпюра элементарных расходов проводится в виде плавной линии, тогда как вычисление частичных расходов по формуле (126) равнозначно прямолинейной интерполяции величин Ω_v между вертикалями.

Недостатком описанных методов является то, что при сравнительно больших расстояниях между вертикалями в них не учитываются

[1] Ср. с аналитической обработкой расхода, измеренного поплавками (§ 47).

промежуточные промерные точки, которые почти всегда располагаются чаще, чем вертикали. Поэтому *Гарляжером* был предложен метод, названный впоследствии его именем и заключающийся в построении двух эпюр: эпюры средних скоростей по вертикалям и эпюры элементарных расходов (аналогичные эпюры поверхностных скоростей и фиктивных элементарных расходов также были приведены в § 47). Первая эпюра (рис. 192) строится по точкам, число которых равно числу вертикалей, и сходит на нуль в точках урезов. Для второй эпюры кроме точек, соответствующих вертикалям, наносятся

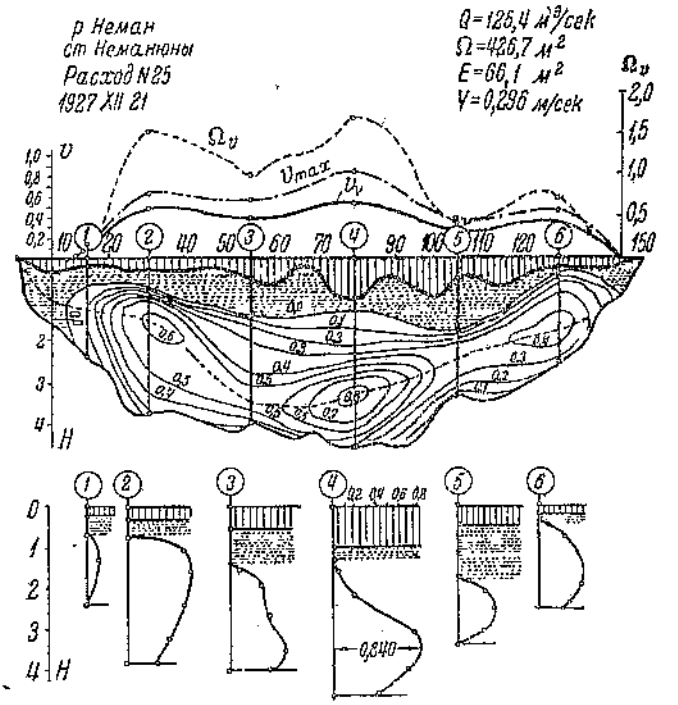


Рис. 193. Графическая обработка расхода при ледяном покрове.

дополнительные точки по ординатам $v_v H$, вычисленным по промежуточным глубинам и скоростям, взятым с первой эпюры.

Рис. 192 представляет образец обработки расхода этим методом, который у нас считается основным. Иногда эпюра элементарных расходов вычерчивается не над линией горизонта воды, а под ней. На основании эпюр распределения скоростей по вертикалям на поперечном сечении реки проведены изотахи. Глубины точек пересечения определенными изотахами вертикалей легко определяются из эпюр скоростей. Для того, чтобы найти точки пересечения изотах со свободной поверхностью и дном, по ширине реки строятся еще эпюры поверхностных и донных скоростей (на рис. 192 показана эпюра поверхностных скоростей). Береговые изотахи проводят путем интерполяции и сообразуясь с очертаниями соседних кривых и линии дна.

На рис. 193 показана схема обработки методом *Гарляхера* зимнего расхода при наличии под кристаллическим поверхностным льдом еще губчатого «донного» льда. Здесь Ω представляет живое сечение потока, E — площадь, занятую льдом (от уровня воды в прорубях книзу).

На ширине живого сечения кроме эпюры средних скоростей v_v построена эпюра максимальных скоростей на вертикалях v_{max}. Как показывают изотахи, поток движется как бы тремя струями, из которых самая мощная проходит через четвертую вертикаль и прижата к дну.

Гарляхером было также предложено производить перемножение глубин и средних скоростей ($H \cdot v_v$) для промежуточных промерных точек графическим путем. Отложим в одинаковом масштабе (рис. 194) на двух взаимно перпендикулярных осях (оси могут пересекаться, вообще говоря, под любым углом) на одной отрезок $OA = v_v$, на другой отрезки $OB = H$ и $OC = 1$ (единице длины в избранном масштабе). Соединим точки A и C и через точку B проведем прямую, параллельную AC, до пересечения с направлением OA в точке D.

Из подобия треугольников OAC и ODB следует:

$$\frac{OD}{OB} = \frac{OA}{OC}, \text{ или } \frac{\overline{OD}}{H} = \frac{v_v}{1},$$

откуда

$$\overline{OD} = v_v H = \Omega_v,$$

т. е. отрезок OD дает в принятом масштабе искомое произведение.

Построение можно делать над чертежом поперечного сечения таким образом. Точка A' эпюры скоростей радиусом $OA' = v_v$ переносится на линию горизонта воды в точку A. На глубине $OC = 1$ через все сечение проводится горизонтальная линия. Построенная по предыдущему точка D радиусом OD переносится на вертикаль в точку D', через которую и проводится эпюра элементарных расходов.

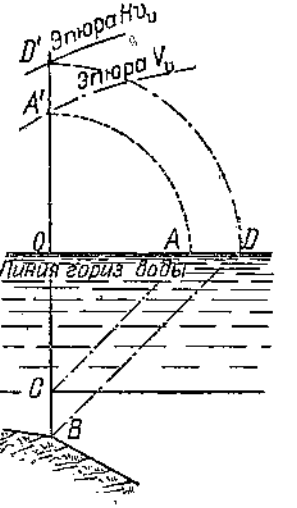


Рис. 194. Графическое перемножение $H \cdot v_v$.

Если масштаб глубин взят $\frac{1}{a}$, скоростей $\frac{1}{b}$, а для элементарных расходов нужен масштаб $\frac{1}{c}$, то масштаб для OC должен быть $\frac{c}{ab}$.

Таким образом по методу *Гарляхера* бо́льшая часть работы может быть выполнена при помощи графических построений. В соединении с вычислением площадей (эпюр скоростей по вертикалям, эпюры элементарных расходов, площади поперечного сечения) при помощи планиметра, этот метод принято называть *графомеханическим* методом. Методы, в которых построение эпюр комбинируется с вычислением площадей по приближенным формулам трапеций, носят название *графоаналитических*.

Наконец, как уже отмечалось выше, обработка расхода может быть произведена и без помощи графических построений — аналитическими методами.

Аналитические упрощенные методы, будучи менее точными, часто применяются на практике для предварительных подсчетов в поле-

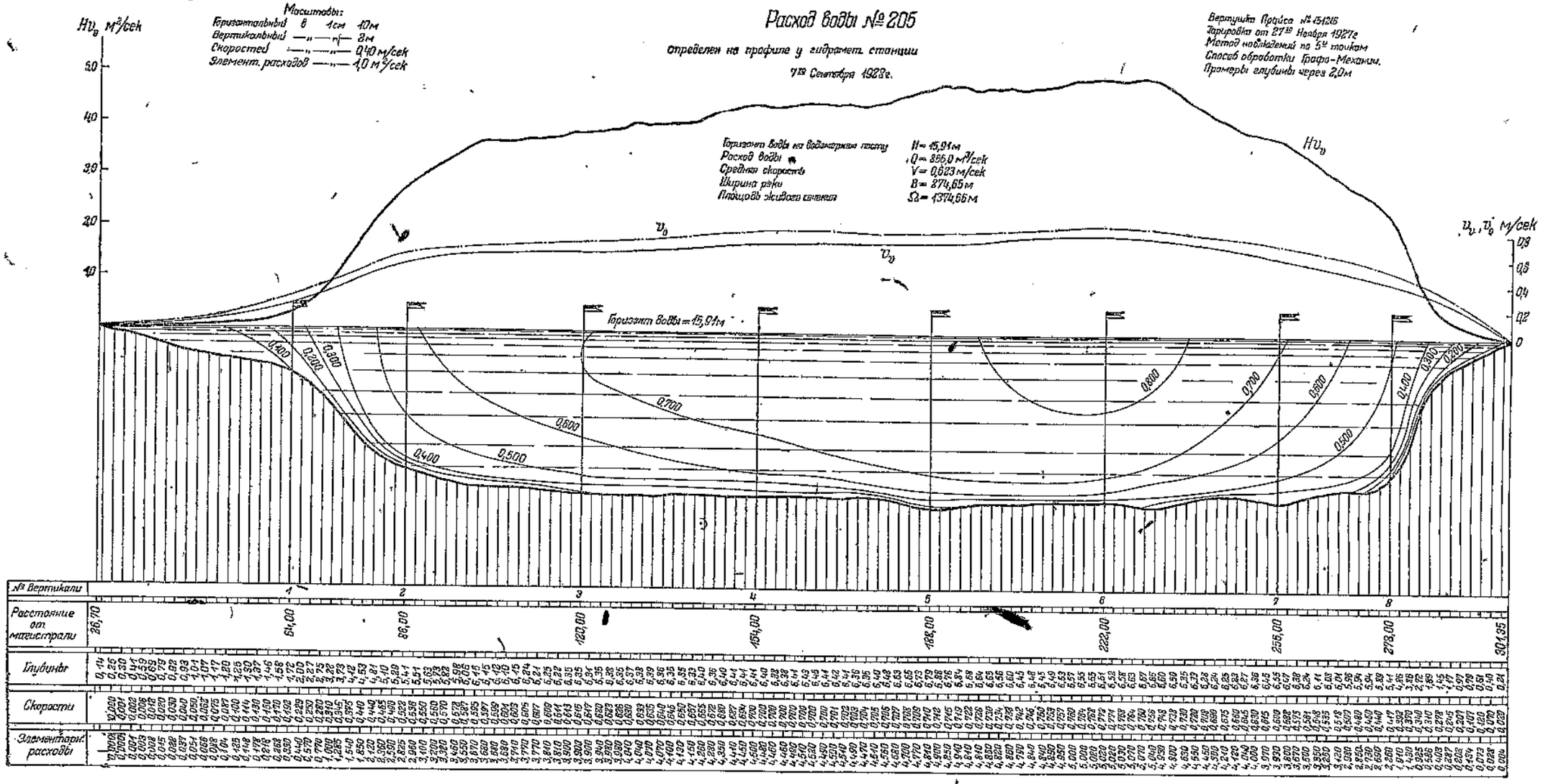


Рис. 192. Графическая обработка расхода воды.

вой обстановке и в этом отношении весьма удобны, так как не связаны с чертежными работами.

В качестве такого упрощенного метода обыкновенно применяется следующий. Частичные расходы q_i вычисляются как произведения частичных площадей поперечного сечения f_i, ограниченных вертикальными линиями, на соответствующие значения средних скоростей $(V_f)_i$:

$$q_i = f_i \cdot (V_f)_i.$$

Если скорости измерялись на всех промерных вертикалях (часто при предварительных подсчетах принимаются во внимание только глубины на скоростных вертикалях), то по схеме, изображенной на рис. 195,

$$f_i = \frac{H_{i-1} + H_i}{2} b_i.$$

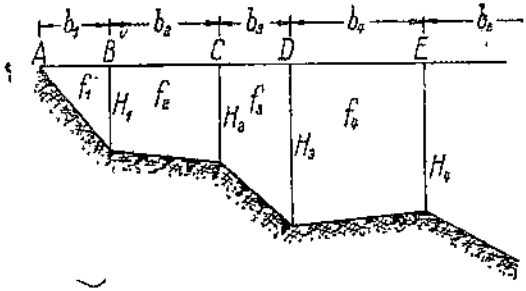


Рис. 195. Схема к аналитической обработке расхода.

За соответствующую этой площади среднюю скорость принимается средняя из скоростей на ограничивающих площадь f_i вертикалях:

$$(V_f)_i = \frac{(v_v)_{i-1} + (v_v)_i}{2}.$$

Таким образом

$$q_i = \frac{H_{i-1} + H_i}{2} b_i \frac{(v_v)_{i-1} + (v_v)_i}{2}. \qquad (128)$$

Для береговых треугольников, полагая скорости в точках урезов (A) равными нулю, имеем:

$$q_1 = \frac{H_1}{2} b_1 \frac{(v_v)_1}{2}.$$

Если число промерных вертикалей вдвое больше, чем скоростных, то удобно применить другой способ (рис. 196). В этом случае границами площадей f служат промежуточные вертикали, а за скорость V_f берется средняя скорость на вертикали, располагающейся между ними:

$$f = \frac{H' + H''}{2} b' + \frac{H'' + H'''}{2} b''.$$

Если расстояния между вертикалями равны, т. е. $b = \text{const}$, то

$$f = \frac{H' + 2H'' + H'''}{2} b$$

и

$$q = f \cdot v_v = \frac{H' + 2H'' + H'''}{2} b \cdot v_v.$$

Иногда встречаются затруднения с вычислением частичных расходов прибрежных участков, где измерения не производились из-за малых скоростей, не улавливаемых вертушкой. Полезно в таких случаях измерить скорость хотя бы приблизительно поплавком. Если же она не измерена, можно поступить таким образом. На двух ближайших к берегу вертикалях (рис. 197) откладываются величины сред-

них скоростей v_v и через полученные точки проводится прямая линия KL. Затем находится центр тяжести O площади AOF прибрежного участка и соответствующая ему величина средней скорости v_v, получающаяся при продолжении прямой KL. Прибрежный участок можно принять за треугольник или трапецию (при крутых берегах) и простым построением или по формулам геометрии определить расстояние точки O от уреза.

Сделаем упрощенное вычисление расхода по данным рис. 192, пользуясь формулами (126) и (128) и учитывая только глубины на скоростных вертикалях. Результаты приведены в таблицах I и II (стр. 170).

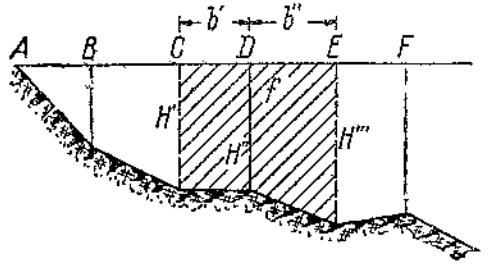


Рис. 196. Схема к аналитической обработке расхода.

Графической обработкой по методу *Гарляхера* (рис. 192) получено: $Q = 856$ *м³/сек.* и $\Omega = 1375$ *м²*. Как видно, результаты упрощенных вычислений очень близко подходят к этим данным: первый способ (табл. I) дал для расхода величину на 1,5% бо́льшую, второй (табл. II) на 1% меньшую. Совпадение величины площади поперечного сечения, благодаря удачному расположению вертикалей, также получилось весьма хорошее (разница 1,5%). Для того, чтобы получить площадь и по первому методу, пришлось бы табл. I дополнить двумя столбцами, цифры которых были бы тождественны с цифрами граф $\left(\frac{H+H''}{2}\right)$ и f табл. II. Таким образом по первому способу мы имели бы таблицу из 9 граф, по второму имеем 8 граф.

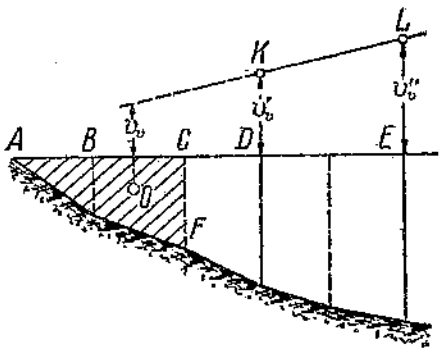


Рис. 197. Определение расхода прибрежных участков.

Предпочтение, несомненно, надо отдать первому способу, как более точному. Количество вычислений, как видим, в обоих способах почти одинаковое (мы не принимаем во внимание необходимого для обоих способов предварительного вычисления средних скоростей на вертикалях).

В первом случае частичный расход по формуле (126) может быть написан так:

$$q' = \frac{v_v' H' + v_v'' H''}{2} b;$$

во втором случае формула (128) дает:

$$q'' = \frac{H' + H''}{2} b \frac{v_v' + v_v''}{2}.$$

Вычитая из первого выражения второе, после несложных преобразований получим:

$$q' - q'' = \frac{b}{4} (H' - H'')(v_v' - v_v'').$$

Таблица I [по формуле (126)].

№ вертикали	Расстояние b м	Глубина H м	Скорость на вертикали v_v м/сек.	Элементарный расход $\Omega_v = Hv_v$	Средний элементарный расход $\frac{\Omega_v' + \Omega_v''}{2}$	Частичный расход q м³/сек.
Ур. л. б.		0	0	0		
	37,3				0,165	6,2
1		1,72	0,192	0,33		
	22,0				1,578	34,7
2		5,41	0,522	2,82		
	34,0				3,362	114,3
3		6,35	0,615	3,90		
	34,0				4,200	142,8
4		6,41	0,700	4,50		
	34,0				4,655	158,3
5		6,79	0,710	4,81		
	34,0				4,915	167,1
6		6,51	0,772	5,02		
	34,0				4,475	152,2
7		6,55	0,600	3,93		
	22,0				3,095	68,1
8		5,41	0,417	2,26		
	23,35				1,130	26,4
Ур. пр. б.		0	0	0		
				-		870,1

Таблица II [по формуле (128)].

№ вертикали	Расстояние b м	Глубина H м	Средняя глубина $\frac{H' + H''}{2}$	Площадь f м²	Скорость на вертикали v_v м/сек.	Средняя скорость $\frac{v_v' + v_v''}{2}$	Частичный расход q м³/сек.
Ур. л. б.		0			0		
	37,3		0,86	32,6		0,096	3,1
1		1,72			0,192		
	22,0		3,565	78,4		0,357	28,0
2		5,41			0,522		
	34,0		5,880	199,9		0,569	113,8
3		6,35			0,615		
	34,0		6,380	216,9		0,658	142,7
4		6,41			0,700		
	34,0		6,600	224,4		0,705	158,2
5		6,79			0,710		
	34,0		6,650	226,1		0,741	167,5
6		6,51			0,772		
	34,0		6,530	222,0		0,686	152,3
7		6,55			0,600		
	22,0		5,980	131,6		0,509	67,0
8		5,41			0,417		
	23,35		2,705	63,2		0,209	13,2
Ур. пр. б.		0			0		
				1394,6			845,8

Отсюда следует, что если оба множителя в скобках будут иметь одинаковый знак, то всегда $q' > q''$. Это имеет место в правильных руслах, где с увеличением глубин увеличиваются и скорости. Если наблюдается обратное соотношение (с увеличением глубин скорости уменьшаются), то $q' < q''$.

Таким образом формула (128) по сравнению с (126) может давать как несколько преуменьшенные (чаще), так и преувеличенные результаты. Разность $q' - q''$ становится равной нулю ($q' = q''$) или когда $H' = H''$ или при $v_s' \rightleftharpoons v_s''$.

При аналитическом вычислении расхода результат можно несколько уточнить, учитывая при подсчете частичных площадей f промежуточные промерные вертикали. Пример такой обработки расхода, вместе с данными промеров и измерения скоростей трехточечным методом, приведен в приложении 7.

В результате той или иной обработки расхода приводятся следующие основные данные: величина расхода Q, соответствующий горизонт воды H, площадь поперечного (живого) сечения Ω, средняя для последнего скорость $V = \frac{Q}{\Omega}$, ширина реки B. Кроме этого иногда еще вычисляются: средняя глубина и отметка среднего дна, смоченный периметр, продольный уклон (по данным наблюдений на уклонных водомерных постах), коэфициент шероховатости русла и пр.

Так как точность измерений обычно не превосходит 2—3%, то не следует вычислять отдельные элементы с большим числом знаков, ограничиваясь в конечных результатах (расход, скорости, площади сечения) лишь тремя значащими цифрами.

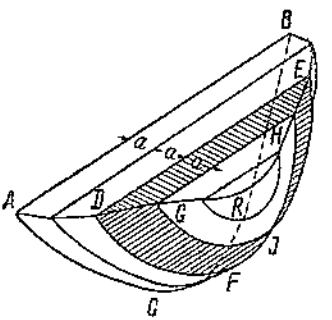


Рис. 198. К вычислению расхода по изотахам (способ Кульмана).

§ 50. Другие методы вычисления расхода. Вычисление расхода по изотахам носит название метода *Кульмана*. Вертикальными плоскостями, параллельными плоскости поперечного сечения (рис. 198) и отстоящими одна от другой на равных расстояниях $a = \Delta v$, модель расхода делится на ряд пластинок, основания которых очерчены по изотахам.

Объем каждой пластинки, например *DEFGHI*, может быть определен по формуле, аналогичной (126):

$$q = \frac{p_i + p_{i-1}}{2} \cdot a,$$

где p есть площадь, ограниченная изотахой и горизонтом воды (рис. 192) или только изотахой (рис. 193).

Объем модели расхода равен

$$Q = \sum q + b = a\left(\frac{p_0}{2} + p_1 + p_2 + \ldots + p_{n-1} + \frac{p_n}{2}\right) + b, \quad (129)$$

причем b есть объем концевого отсека R, высотой a', которая меньше a, с основанием p_n.

Ввиду незначительности объема b по сравнению с величиной Σq, можно приближенно вычислить его по формуле параболоида:

$$b = \frac{p_n a'}{2}.$$

Площадь нулевой изотахи p_0 равна площади живого сечения потока.

Площади изотах по чертежу (рис. 192) измеряются планиметром и затем расход вычисляется по формуле (129).

Видоизменением этого способа является вычисление объема модели расхода по площадям между смежными изотахами (рис. 199), т. е. определение объемов цилиндрических колец и полуколец (например, *KMDFIEN*) путем умножения площади основания (*KLNM*) на среднюю высоту, равную полусумме ограничивающих скоростей:

$$q = (p_i - p_{i+1}) \frac{v_i + v_{i+1}}{2}$$

или

$$q = (p_i - p_{i+1}) \left(ia + \frac{a}{2} \right).$$

Полный расход $Q = \Sigma q$, т. е.

$$Q = (p_0 - p_1) \frac{a}{2} + (p_1 - p_2) \frac{3a}{2} + (p_2 - p_3) \frac{5a}{2} + \dots +$$
$$+ (p_{n-1} - p_n) \left(na - \frac{a}{2} \right) + p_n \left(na + \frac{a'}{2} \right). \qquad (130)$$

При определении площадей изотах планиметром, равно как и площади поперечного сечения, надо иметь в виду разные масштабы горизонтальных расстояний и глубин. Проще всего определить цену деления планиметра, построив в этих масштабах прямоугольник, изображаемая которым площадь известна, и деля затем величину этой площади на число делений, полученное при обводке.

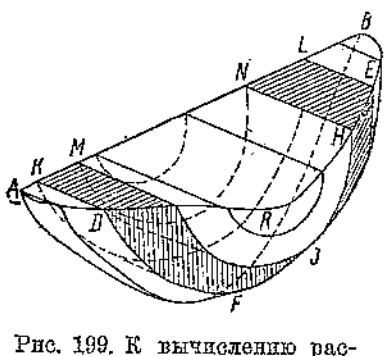


Рис. 199. К вычислению расхода по изотахам (видоизмененный способ Кульмана).

Метод *Кульмана* был применен впервые в 1847 г. *Баумгартеном* и позднее усовершенствован *Гарлахером*. Можно заменить часть вычислений по этому методу построением *тахографической кривой* (рис. 200). Кривую строят, откладывая по абсциссам в некотором масштабе площади p, ограниченные изотахами, а по ординатам — соответствующие скорости. Площадь полоски, шириной dp и высотой v, представляет элементарный расход через соответствующую изотаху. Полный расход Q равен:

$$Q = \int_0^{p_0} v dp,$$

т. е. площади, ограниченной кривой и координатными осями, причем эта формула соответствует порядку подсчета расхода по видоизмененному методу *Кульмана*.

Если взять горизонтальную полоску высотой dv и длиной p, то

$$Q = \int_0^{v_{max}} p dv,$$

что соответствует подсчету по первоначальному способу *Кульмана*.

Применение метода *Кульмана* рекомендуется для широких рек с неправильным руслом. Недостатком его является трудность вычерчивания изотах.

Тот же метод, при наличии большого числа измеренных скоростей в отдельных точках, применяется для точного вычисления расходов воды в турбинных камерах и трубопроводах.

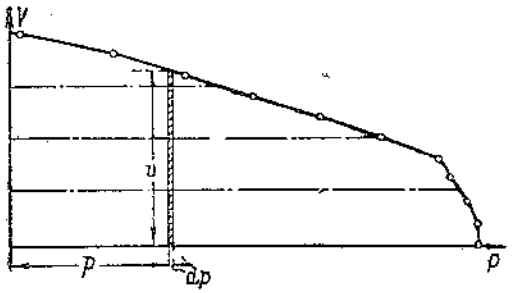


Рис. 200. Тахиграфическая кривая к способу Кульмана.

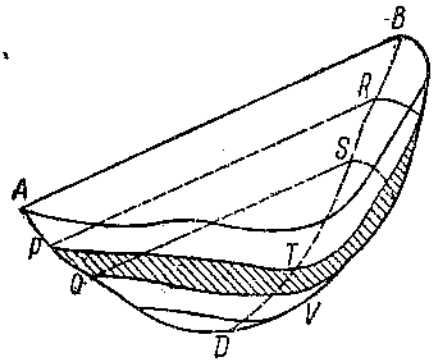


Рис. 201. К вычислению расхода по скоростям на горизонталях.

Третий метод подсчета расхода — по эпюрам распределения скоростей на разных глубинах — на практике не применяется, хотя теоретически вполне целесообразен.

Модель расхода разбивается на ряд пластинок горизонтальными плоскостями (рис. 201), и объем каждой пластинки, например *PQTRS*, определяется как полусумма оснований, ограниченных поперечным сечением и эпюрами, помноженная на высоту, т. е. разность глубин, соответствующих эпюрам. Эпюры для разных глубин можно построить, беря скорости из кривых распределения скоростей на отдельных вертикалях.

И для этого способа может быть построена кривая (рис. 202), площадь которой соответствует величине полного расхода. Ее ординатами являются глубины H, а абсциссами — площади F, ограниченные отвечающими им эпюрами.

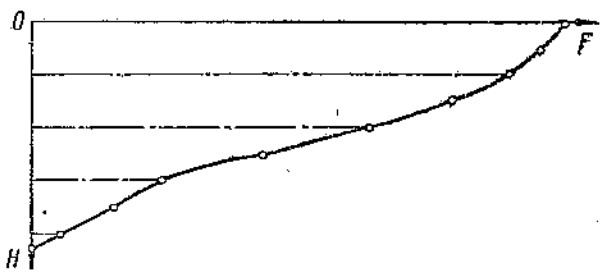


Рис. 202. Тахиграфическая кривая для вычисления расхода по скоростям на горизонталях.

Следует еще раз отметить, что во всех способах вычисления расхода средняя для сечения скорость V определяется уже после того, как величина расхода известна, из уравнения (110) путем деления ее на площадь живого сечения $\left(V=\frac{Q}{\omega}\right)$. Только в исключительных случаях она может быть точно определена раньше вычисления расхода и служить для него (ширма *Андерсона*, солевой экран, — § 21), не считая грубо приближенных способов, позволяющих определять ее на основании измерения поверхностных скоростей поплавками (§ 47).

Имея эпюру распределения средних скоростей на вертикалях v_v по ширине реки (рис. 192), определяя ее площадь и деля последнюю на ширину B, мы получаем среднюю из средних скоростей, V_v, которая не равна средней для всего сечения скорости V.

Действительно, скорость V равна:

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{\int_0^B v_v H dl}{\int_0^B H dl},$$

скорость же V_v равна:

$$V_v = \frac{\int_0^B v_v dl}{\int_0^B dl}.$$

Эти два выражения были бы равны между собой только при условии $H = \text{const}$, т. е. для русла прямоугольного поперечного профиля, чего в естественных потоках мы никогда не имеем.

Можно было бы поступить таким образом. Средняя глубина потока:

$$H' = \frac{\omega}{B}.$$

Фиктивные средние скорости на вертикалях, соответствующие ей, равны:

$$v_v' = \frac{H v_v}{H'}.$$

Если по ним построить новую эпюру по ширине реки и разделить ее площадь на ширину B, то получим

$$V_v' = \frac{\int_0^B v_v' dl}{B} = \frac{\int_0^B H v_v dl}{H'B} = \frac{Q}{\omega},$$

т. е. действительную среднюю скорость для всего сечения V.

§ 51. Приведение расхода к условному горизонту. Так как операция измерения скоростей при определении расхода занимает всегда некоторое время — несколько часов, а иногда и больше суток, то чрезвычайно важно, чтобы расход за это время не изменялся или изменялся бы так мало, чтобы практически его можно было считать постоянным.

Иначе говоря, измерения должны производиться при установившемся движении потока или при близком к таковому, о чем можно судить по состоянию горизонта воды на водомерном посту. Если горизонт воды не оставался постоянным за время измерений, то это значит, что изменялся и расход, и тогда отдельные измерения скоростей на вертикалях или даже в отдельных точках соответствуют в сущности каждое разному расходу, из которого удалось зафиксировать лишь какую-то небольшую часть.

Какую же величину расхода считать в конце концов измеренной и к какому уровню воды ее отнести? Так как даже при действительно установившемся движении мы не могли бы измерить расход с абсолютной точностью вследствие несовершенства приборов и методов вычисления, то естественно пренебречь некоторыми, практически незначительными и покрываемыми неизбежной неточностью результата изменениями расхода. Принято поэтому, если площадь поперечного сечения потока за время измерений изменяется меньше, чем на 1%, или изменение горизонта не превышает 1 *см* в час, не считаться при вычислении с этим обстоятельством, а величину расхода приписывать среднему горизонту, принимая за последний среднее арифметическое из показаний водомерного поста.

На реках, где большие колебания уровня редки или измерение расхода занимает мало времени, ограничиваются наблюдениями на водомерном посту лишь при начале и в конце измерений, относя расход к среднему уровню. Если же уровень воды изменяется быстро и значительно (например, на некоторых реках на 1—2 *м* в день), то приходится применять более сложные методы вычисления (если нельзя ускорить самые измерения) и относить расход к какому-то *условному рабочему горизонту*. Уровни в этом случае необходимо наблюдать непрерывно или возможно чаще.

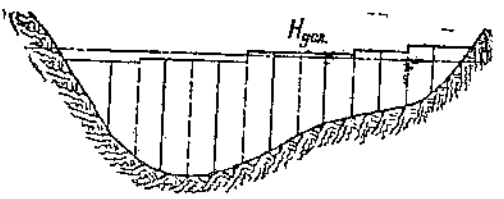


Рис. 203. Условный рабочий горизонт.

Высота условного рабочего горизонта обыкновенно вычисляется следующим образом (рис. 203). На профиле поперечного сечения по створу вертикальными линиями, проведенными через середины расстояний между скоростными вертикалями, выделяются относящиеся к последним частичные площади f (см. § 49) и проводится ступенчатая линия горизонтов воды, соответствующих измерениям на каждой вертикали. Затем подсчитываются частичные расходы q и приближенное значение расхода Q', как их сумма.

Принимая веса высот горизонтов H_i, соответствующих каждой скоростной вертикали, пропорциональными величинам расходов q_i, получим высоту условного горизонта $H_{усл}$ равной:

$$H_{усл} = \frac{q_1H_1 + q_2H_2 + \dots + q_nH_n}{q_1 + q_2 + \dots + q_n} = \frac{\Sigma q_iH_i}{Q'}. \qquad (131)$$

Высоты горизонтов H_i и $H_{усл}$ могут быть взяты над нулем водомерного поста или по отношению к любой горизонтальной плоскости (для удобства вычислений, например, если уровни на посту изменялись от $+3{,}16$ до $+3{,}60$ *м*, то удобно брать высоты сверх 3,00 *м*).

Таким образом условному горизонту $H_{усл}$ соответствует такая срезка площади поперечного сечения, при которой приближенная величина расхода Q' остается неизменной.

По установленному условному горизонту пересчитываются глубины промерных точек и вертикалей, и расход может быть более точно вычислен графомеханическим или графоаналитическим способом.

Если колебания уровня во время измерений были велики, то надо исправить и величины средних скоростей на вертикалях. *Гарлахер* предложил для этого пользоваться зависимостью:

$$v_v' = v_v \left(\frac{H'}{H}\right)^{\alpha},$$

предполагая, что средняя скорость на вертикали v_v изменяется пропорционально некоторой степени α глубины H :[1]

$$v_v = CH^{\alpha}.$$

Однако коэфициент α не отличается постоянством. Как первое приближение, можно принять для него значения в пределах 0.5—0,7, хотя *Гарлахер* при работах на Дунае получал и значительно бо́льшие величины.

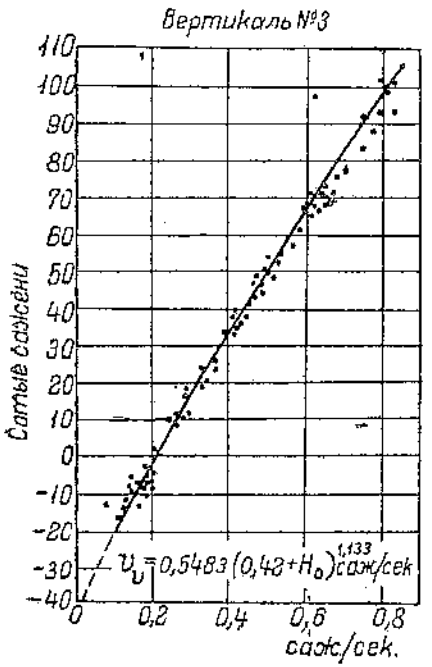


Рис. 204. Кривая $v_v = f(H)$.

Более надежным способом исправления средних на вертикалях скоростей при изменении глубины является установление для каждой вертикали зависимости между этими элементами на основании ряда измерений. Такая работа возможна и целесообразна для постоянных гидрометрических станций, где большей частью положение створа и вертикалей остается неизменным. На рис. 204 изображена такая зависимость для одной из вертикалей Гостинопольской гидрометрической станции на р. Волхове (до постройки плотины). Для кривой можно подобрать уравнение:

$$v_v = f(H),$$

придавая ему тот или иной вид [например, считая кривую за параболу $v_v = a + bH + cH^2$, или в виде $v_v = a(b+H)^m$].[2]

Вместо глубины при устойчивом русле можно брать соответствующую высоту уровня. Точки в поле чертежа обыкновенно несколько разбрасываются, что зависит главным образом от непостоянства продольного уклона поверхности потока, а также от других причин. Имея такие кривые для всех вертикалей, нетрудно определить значение средней скорости на них при любых глубинах или горизонтах. Однако, если такие кривые установлены, то расход может быть вычислен и без измерения скоростей — по одной высоте уровня, определяющей глубины всех точек профиля дна (при устойчивом русле). Этот способ является уже переходом к определению расхода по так называемой «кривой расходов» (см. гл. IV).

Ясмунд дает способ определения условного горизонта для случая, когда уровень воды в створе стоит у одного берега выше, чем у другого, и водомерные наблюдения ведутся у обоих берегов через определенные промежутки времени (например, через ½ часа или час). Тогда строится график (рис. 205) колебаний

---

[1] Ср. с формулой *Шези*:

$$V = C\sqrt{RI}\,. \qquad (132)$$

Полагая $I = \text{const}$ и $R = H$, получаем

$$V = C_1 H^{3/2}.$$

[2] Определение коэфициентов такого вида уравнений см. в гл. IV.

уровня у обоих берегов, на котором отмечаются моменты начала и конца измерений на каждой вертикали (границы заштрихованных частей). Рабочий уровень для каждой вертикали (для среднего момента) подсчитывается из уровней у берегов по расстоянию от них вертикали, в предположении, что уровень от одного берега к другому изменяется по прямой линии. Далее условный горизонт определяется по предыдущему, по формуле (131).

Владычанский для этого случая предлагает находить повышение или понижение рабочего уровня вертикали по отношению к начальному уровню (если наблюдения на обоих берегах делались только в начале и в конце измерения расхода) графически следующим путем (рис. 206). Линия AN — горизонтальная, линия AB — наклонная прямая, причем отрезок BN показывает, насколько уровень воды в створе стоит у одного берега выше (или ниже), чем у другого. BC и AD — оси времени, проведенные под углом 45° к AB. Отрезки ED и KC — изменения (подъем) уровня при конце измерений у обоих берегов и отложены перпендикулярно к осям времени. BK и AE — линии изменения уровня у обоих берегов за время $BC = AD$. Для любой вертикали M строим $MP \parallel BC$ и $PR \perp MP$. Линия MR показывает ход изменения уровня на этой вертикали. Если измерения на ней соответствуют среднему моменту времени T, то проводим $TS \parallel AB$ и $SQ \perp MP$. Отрезок SQ и дает изменение уровня по отношению к начальному (в момент B) на вертикали M в момент производства измерений на ней. Прибавляя его к начальному уровню, получаем рабочий горизонт на вертикали. То же проделывается для всех вертикалей, после чего по формуле (131) определяется условный горизонт.

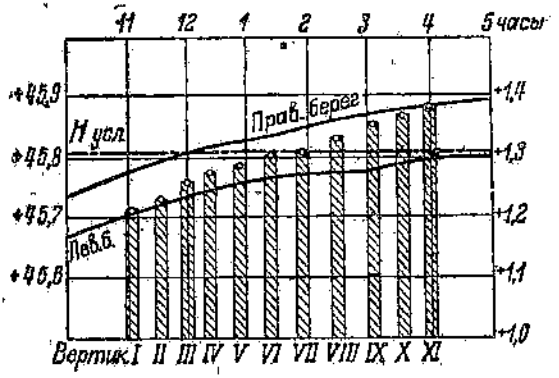


Рис. 205. Способ Ямундa.

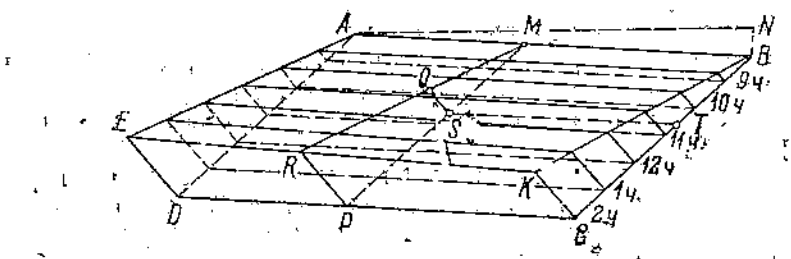


Рис. 206. Способ Владычанского.

§ 52. Источники ошибок и точность определения расходов по измеренным скоростям. Вопрос о точности результатов определения расходов, получаемых путем применения наиболее распространенных приборов и методов, является существенно важным практически, но недостаточно разработанным и выясненным вследствие своей сложности.

Все источники ошибок можно разделить на 4 группы:

1) устройство и тарировка инструментов,

2) неправильное пользование инструментами (ошибки установки и отсчетов),

3) изменчивость измеряемых величин во времени,

4) «гипотеза о форме», т. е. наше представление о распределении

измеряемых величин в пространстве, которое в той или иной мере может отличаться от действительности.

Первые две ошибки можно уменьшить, пользуясь наиболее точными, не меняющимися в работе приборами и производя измерения с возможной тщательностью. Эти ошибки в том или ином размере неизбежны: они зависят от несовершенства инструментов (даже наиболее точных), личных недостатков наблюдателя и внешних условий (свойств измеряемых величин, вспомогательных приспособлений, обстановки работ и пр.).

Ошибки, происходящие вследствие изменчивости измеряемых величин и гипотезы о форме, устранить труднее. Для скоростей или расхода, которые суть не строго постоянные, но непрерывно меняющиеся величины, приходится принимать условные средние значения, получающиеся как результат измерения, растянувшегося на более или менее длительное время. Иначе подойти к величине этих элементов мы и не можем, так как колебания их обусловливаются взаимодействием целого ряда сложных и переменных факторов. В результате измеренный расход представляет лишь сумму отдельных частей переменной величины и даже при абсолютной точности всех процессов измерения и вычисления выразит лишь условную характеристику совокупности вариантов, которая может и не вполне отвечать поставленной цели измерений.

Ошибка гипотезы обусловливается прежде всего тем, что нам не видна форма измеряемых объектов и мы не можем приурочить пункты измерений к местам характерных изгибов, а при окончательных вычислениях не можем учесть того, что делалось в натуре между точками измерений. Эта ошибка возрастает еще более, когда при измерениях мы пользуемся упрощенными схемами, предполагая правильное течение с устойчивым и закономерным распределением скоростей и сообразуя с этим расположение вертикалей и выбор коэфициентов. Так, например, неровности русла выше и ниже створа, оставаясь незамеченными, отражаются на форме модели расхода.

Для оценки точности измерений рекомендуется хотя бы изредка производить «опорные» измерения наивысшей точности, с которыми и сравнивать обычные измерения. Анализ таких материалов, полученных на реках различного характера (горных, равнинных, болотных), при разном грунте дна и типе берегов, различного очертания в плане и разных размеров, позволил бы установить величину поправок и ошибок, даваемых инструментами, наблюдателем, вариацией измеряемых величин и упрощенными схемами работ, основанными на гипотезе о правильности течения.

Так как определение расхода слагается из двух основных полевых операций — измерения площади поперечного сечения и скоростей и операции по вычислению расхода, то естественно попытаться как-то оценить в смысле точности эти три основных момента.

Измерение площади поперечного сечения состоит из промеров глубин и определения расстояний по створу. Ошибки при измерении глубин зависят от типа промерного прибора, характера дна и точности отсчетов. Ошибки в расстояниях связаны со способами определения последних и неточностью совмещения промерного прибора

с отмеченной вертикалью. В общем и те и другие ошибки обычно не превышают 1—2%.

На точность измерения скоростей, помимо конструкции прибора, влияют ошибки:

1) установки прибора,
2) определения времени,
3) отсчетов показаний прибора,
4) определения скорости по тарировочным данным.

Ошибки установки прибора связаны с неточным определением глубины его погружения и расстояния по ширине реки (например, для поплавков), с неправильным направлением оси (вертушки) или входного отверстия (батометров и трубок), а также со способом установки (на штанге, тросе, с мостика, люльки, парома и т. д.). Сюда же может относиться влияние неправильности установления створа в плане, равно как и характер выбранного участка.

Ошибки в отсчетах времени при достаточной продолжительности могут быть очень малы, так же как и ошибки отсчетов показаний прибора (по счетчику вертушки, при измерении объема воды в батометре и т. п.).

Ошибки в определении скорости по тарировочной кривой могут быть значительно больше, чем точность самой тарировки, так как здесь большое влияние оказывает неодинаковость условий работы прибора при тарировке и при измерении скоростей.

Принято считать, что в хороших условиях скорости могут быть определены с точностью до 1%, в обычных — до 3%, а в плохих — до 10% и более грубо.

На результат вычисления расхода влияет, как уже отмечалось, его изменчивость и ошибки гипотезы о форме, а кроме того и точность определения средних скоростей на вертикалях, число вертикалей и их расположение и метод обработки.

Обыкновенно считают, что измерением скоростей в отдельных точках при определении расхода в лучшем случае можно добиться точности до 2%, в обычных же условиях работы (вертушкой) около 5%.

При работах по определению степени точности измерений расходов р. Сыр-Дарьи в 1915 г. на Зализорожской гидрометрической станции, оборудованной паромом, передвигающимся по тросу, и штанговой магнитной вертушкой *Отта*, нами было найдено, что ошибки расстояний по размоточному тросу для отдельных вертикалей в редких случаях достигают 1%, ошибка же в определении расстояния между крайними вертикалями (160 *м*) составляет всего 0,3%.

Площадь живого сечения, при измерении глубин штангой от вертушки, отличалась от промеренной через 1,07 *м* (0,5 саж.) и равной 312,6 *м*²:

при промерах через	3,2 *м* (1,5 саж.)	на	0,06%
„ „ „	6,4 „ (3,0 „)	„	0,22%
„ „ „	12,8 „ (6,0 „)	„	1,5%

Здесь величина ошибок при больших расстояниях между промерными точками, конечно, тесно связана с плавностью линии дна и удачным размещением промерных вертикалей (в точках перелома линии дна).

О работах по выяснению необходимой продолжительности измерений в отдельных точках для исключения влияния пульсации и связанных с ней ошибок уже было сказано в § 37.

Сопоставление величин расхода, определенных в одном случае по 10 вертикалям с большой продолжительностью наблюдений (от 2 мин. у поверхности до

9 мин. у дна), в другом по 21 вертикали при 200 оборотах вертушки в точке (от ½ мин. до 1½ мин.), обработанных графомеханическим способом, дало расхождение всего 0,7% при величине расхода около 340 *м³/сек.* При этом скорости измерялись в 6 точках на каждой вертикали (через 0,2 *м* глубины).

Сравнение расходов, измеренных одной и той же вертушкой на штанге и на тросе (на 10 вертикалях) по одноточечному методу (на 0,6 глубины), с продолжительностью наблюдения не менее 6 минут в точке, дало расхождение 1,3% (расход для вертушки на штанге 330,6 *м³/сек.*, на тросе 326,8 *м³/сек.*), что может служить указанием на правильность положения створа.

Для р. Волхова на основании исследований 1924 г. *Вальман* определил среднюю ошибку измерения расходов вертушкой в 1,6%, исходя из ошибок определения глубин, расстояний и средней скорости на вертикали по трехточечному способу [формула (42)]. Принимая же во внимание другие факторы, влияющие на точность измерений (ошибки тарировки, определения горизонта воды, подсчетов), можно считать, что таковая в действительности не выходила за пределы 3—4%.

§ 53. Определение расхода водяными дюймами, модулями и водосливами. Для определения небольших расходов ручьев, ключей, мелких каналов, устьев дренажной сети и т. п., наряду с объемным способом, применяются методы измерения, основанные на *гидравлических формулах* истечения через отверстия и водосливы.

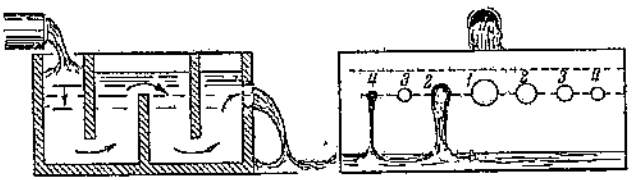


Рис. 207. Водяной дюйм Борнемана.

Как известно, при истечении через отверстия (и насадки) можно пользоваться формулой:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH_0}, \qquad (133)$$

где μ — *коэффициент расхода*,

ω — площадь отверстия,

g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 *м/сек²*,

H — напор над центром тяжести отверстия, исправленный на «*скорость подхода*» ($H_0 = H + \frac{V_0^2}{2g}$, где H — геометрическая величина напора), или соответственная разность уровней при затопленном отверстии. При небольшой скорости подхода V_0 ее влиянием можно пренебречь.

Для постоянных μ и ω расход всецело определяется величиной H.

«*Водяные дюймы*» представляют ящики с отверстиями, через которые пропускается измеряемый расход. Открывая или закрывая часть отверстий, можно добиться, чтобы напор имел определенную величину. Тогда расход определяется как сумма расходов через открытые отверстия.

Первоначально водяным дюймом называлось то количество воды, которое вытекает через круглое отверстие диаметром 1 дюйм (25,4 *мм*) за 24 часа при минимальном напоре (в уровень с верхней кромкой отверстия), составлявшее около 16 *м³*. Отсюда и приборы получили то же название. Новый французский водяной дюйм при диаметре отверстия 20 *мм* и напоре 40 *мм* пропускает в сутки 20 *м³* воды.

. Водяной дюйм *Борнемана* (рис. 207) представляет большой ящик, разделенный перегородками для успокоения воды, с отверстиями в передней стенке. Для измерения произвольной величины расхода прибор имеет 7 круглых отверстий, центры которых лежат на одной высоте. Диаметр наибольшего отверстия — около дюйма (26,15 *мм*), остальные отверстия (справа и слева) меньше в 2, 4 и 8 раз.

В ящик вода подводится по трубе; закрывая пробками те или другие отверстия, добиваются того, чтобы напор установился постоянным, равным диаметру

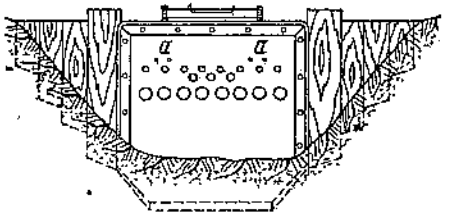


Рис. 208. Водомер Игнатова.

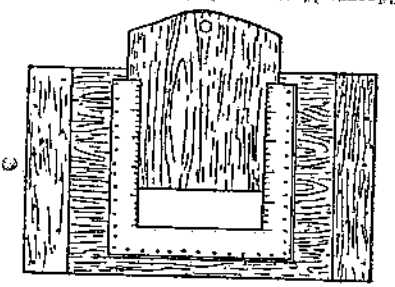


Рис. 209. Модуль Понселе.

большого отверстия. При этом расход через каждое отверстие известен. Он обычно не вычисляется, а определяется заранее при помощи тарировки или калибрования прибора объемным способом.

Водомер *Игнатова* (рис. 208) представляет железный щит с рядами отверстий разного диаметра и с контрольными трубками *aa*, на уровне которых поддерживается уровень воды во время измерения. По этим трубкам, а также по цилиндрическому уровню сверху щита последний устанавливается так, чтобы центры отверстий каждого ряда находились на одной высоте. Щит втыкается заостренной кромкой в дно ручья или канала и закладывается по бокам досками с замазкой щелей глиной.

К тому же типу приборов принадлежит *гидрометрическое ведро*, или *данаида*, с отверстиями в дне, снабженными насадками и закрываемыми пробками.

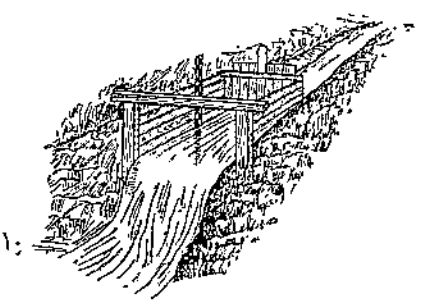


Рис. 210. Модуль с водосливом.

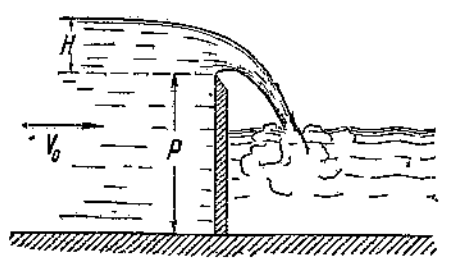


Рис. 211. Водослив с тонкой стенкой.

Под «*водяными модулями*» обыкновенно понимаются устройства, применяемые на оросительных системах с целью регулирования и учета воды, отводимой в мелкие каналы. Такого рода простейшие приборы, основанные на том же принципе, что и водяной дюйм, но для измерения больших расходов, применялись уже в XVI веке: вода пропускалась через прямоугольное отверстие, ширина которого изменялась при помощи боковой задвижки.

В модуле *Понселе* (рис. 209) ширина отверстия остается постоянной, а изменяется его высота. И в том и в другом случае прибор может быть протарирован для некоторого постоянного напора.

Нередко модуль устраивается в виде *водослива* (см. ниже), перед которым в некотором расстоянии устанавливается щит, преграждающий канал и регули-

рующий поступление воды и напор на водосливе (рис. 210). Напор определяется по рейке, поставленной между водосливом и щитом так, что нуль ее расположен на одной высоте с порогом водослива.

Более сложные конструкции модулей, которыми достигается независимость пропускаемого расхода от колебаний его в канале, откуда забирается вода (модули *Кеннеди, Джибба* и др.), описываются в специальных курсах орошения.

Гидравлика дает весьма точные формулы для величины расхода через *водосливы с тонкой стенкой*, благодаря чему эти водосливы являются хорошими измерителями. Устройство их широко практикуется в лабораторных условиях, находя также применение при определении расхода небольших каналов, ручьев и т. п.

Общая формула расхода через водослив, как известно, имеет вид:

$$Q = mb\sqrt{2g}H^{3/2}, \qquad (134)$$

где m — коэфициент расхода водослива,

b — его ширина,

H — напор над ребром водослива (рис. 211). Если известны эти элементы, то расход может быть легко вычислен.

Измерительные водосливы устраиваются обычно так, чтобы водослив был незатопленным и под струю был обеспечен свободный доступ

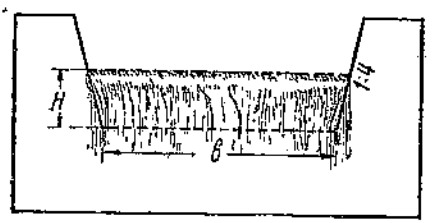


Рис. 212. Водослив Чиполетти.

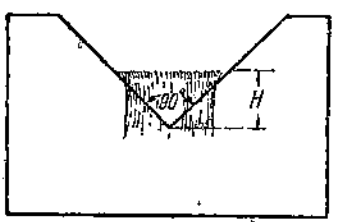


Рис. 213. Водослив Томсона.

воздуха (см. курсы гидравлики), так как при этом коэфициент расхода m определяется наиболее точно. Для обеспечения этого условия ребро водослива располагается всегда несколько выше наивысшего уровня воды за водосливом.

Кроме того важно правильно и точно измерить напор, для чего рейка, нуль которой лежит на высоте ребра, должна быть достаточно удалена от последнего (на расстояние от трех до пяти напоров), не говоря уже о правильной установке и обделке краев самого водослива и соблюдении некоторых условий, обеспечивающих надежный результат при пользовании формулами (применимость их в определенных пределах).

Для *прямоугольного* водослива без *бокового сжатия* (ширина канала равна ширине водослива) высокую точность (до 1%) дает формула *Базена*, согласно которой коэфициент расхода равен (для метрических мер):

$$m = \left(0{,}405 + \frac{0{,}003}{H}\right)\left[1 + 0{,}55\left(\frac{H}{H+p}\right)^2\right], \qquad (135)$$

где p — высота горизонтального ребра водослива над дном прямоугольного канала (см. рис. 211). Эта формула проверена для b до 2 *м*.

H до 1,24 *м* и p до 1,3 *м* и вторым множителем (в квадратных скобках) учитывает скорость подхода.[1]

Для прямоугольного водослива *с боковым сжатием* по *Эгли* («полная формула *Базена*»):

$$m = \left(0{,}405 - 0{,}030\frac{B-b}{B} + \frac{0{,}0027}{H}\right)\left[1 + 0{,}55\left(\frac{b}{B}\right)^2\left(\frac{H}{H+p}\right)^2\right] \quad (136)$$

(B — ширина канала). Эта формула испытана для b от 0,2 до 5,5 *м*, B от 1,0 до 6,3 *м*, p от 0,15 до 3,3 *м* и H от 0,10 до 0,60 *м*, а также для нескольких водосливов в одной стенке. При большой ширине B по сравнению с b (например, пруд) член $\left(-0{,}030\frac{B-b}{B}\right)$ заменяется выражением $\left(-\frac{0{,}033}{1+b}\cdot\right)$

Нередко применяется *трапецоидальный* водослив *Чиполетти* (рис. 212) с наклоном боковых граней 1 : 4, для которого

$$Q = 1{,}86 b H^{3/2}. \quad (137)$$

При этом напор H должен быть в пределах от 0,1 b до 0,33 b и перед водосливом необходим успокоительный бассейн для того, чтобы сжатие струи снизу и по бокам было полным и влиянием подходной скорости можно было пренебречь.

Для *треугольного* водослива *Томсона* с прямым углом внизу (рис. 213)

$$Q = 1{,}4 H^{5/2}. \quad (138)$$

Весьма хорошими измерителями являются водосливы с *параболическим* вырезом, исследованные *Грёве*. Для них расход выражается формулой:

$$Q = 0{,}293\ p^{488}\ H^2, \quad (139)$$

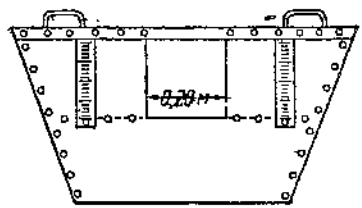


Рис. 214. Водосливная рамка.

где p — параметр уравнения обыкновенной параболы ($x^2 = 2py$), выраженный в *см*, H и Q — в метровых размерах.

Устройство «тонкой стенки» в измерительных водосливах удобнее всего осуществляется вставкой железного листа с соответственным вырезом.

Простейшие переносные водосливные *рамки* (рис. 214) изготовляются из листового железа толщиною 1,5—2 *мм*, к которому для жесткости прикрепляются железные полоски. Такая рамка врезается в дно и откосы канала и устанавливается в правильном положении благодаря боковым шкалам — так, чтобы показания последних на уровне воды с верховой стороны были одинаковыми. Тарировка таких рамок, т. е. определение величины коэфициентов расхода производится объемным способом.

В США на фермерских орошаемых хозяйствах распространены водосливные устройства типа, показанного на рис. 215.

---

[1] В этом случае применима также формула *Ребока*:

$$m = 0{,}403 + 0{,}0533\frac{H}{p} + \frac{1}{1500H}.$$

Постоянные измерительные водосливы часто устраиваются в виде бетонных, каменных, металлических или деревянных (шпунтовых) стенок. Иногда в средней части их (рис. 216) для измерения малых (меженных) расходов устраивается водослив меньших размеров.

Возле постоянных водосливов нередко сооружаются мерные (бетонные) ящики, служащие для тарировки и измерения очень малых расходов, когда вследствие незначительного напора нельзя пользоваться формулой (134), так как струя «прилипает» к стенке.

На существующих эксплоатационных плотинах, представляющих водосливы так называемых *практических профилей* и водосливы *с широким порогом*, приближенное вычисление расхода возможно

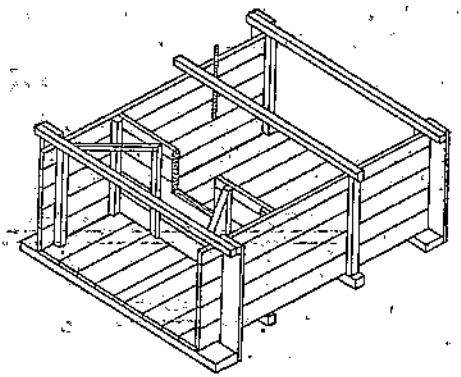


Рис. 215. Американский модуль.

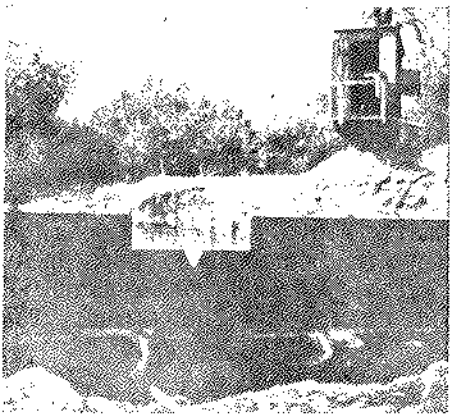


Рис. 216. Измерительный водослив.

путем применения соответствующих формул и коэфициентов гидравлики. Более точно для каждого конкретного случая эти коэфициенты могут быть определены тарировкой, т. е. тщательным определением расхода вертушкой. Если это сделано для разных случаев (водосливной части, щитовых отверстий), то в дальнейшем расход просто определяется по высоте напора, числу открытых щитов и положению нижнего уровня (если надо учесть затопление). При этом на гидроэлектрических станциях расход, проходящий через турбины, вычисляется по напору, мощности турбин и их коэфициенту полезного действия; для точного определения последнего нужно также предварительное измерение расхода другим методом (вертушкой или способами смешения).

На каналах (главным образом оросительных и служащих для водоснабжения) иногда применяется так называемый *открытый водомер Вентури* (см. ниже, § 56), представляющий по существу тот же водослив (с широким порогом), где перепад получается за счет постепенного сужения сечения в плане, которое может быть усилено поднятием дна. В таком случае (рис. 216-а) расход определяется по формуле:

$$Q = C\frac{b_2 h_2}{\sqrt{1-\left(\frac{b_2 h_2}{b_1 h_1}\right)}}\sqrt{2g(h_1 - h_2)},$$

где обозначения понятны из чертежа, а C есть коэфициент, определяемый тарировкой.

Для вычисления расхода необходимо знать глубины h_1 и h_2, которые определяются по рейкам или лимнитрафам.

Если водослив не «затоплен», т. е. глубина h_3 недостаточна для надвигания нижнего уровня на сечение с глубиной h_2, то между глубинами h_1 и h_2 устанавливается определенное соотношение (см. курсы гидравлики), и для вычисления расхода достаточно знать одну величину h_1 (или h_2).

Сужение канала может быть устроено как при прямоугольном поперечном профиле (как на рис. 216-а), так и при обыкновенно встречающемся трапецоидальном. Во всех случаях дно и стенки на участке водомера должны быть особо прочными и неизменяемыми (например, из бетона).

§ 54. Определение расхода по площади живого сечения и продольному уклону потока. Согласно основным зависимостям гидравлики (110) и (132) расход потока Q равен:

$$Q = \omega V = \omega C\sqrt{RI}, \quad (140)$$

следовательно для его вычисления нужно определить:

1) площадь живого сечения,

2) гидравлический радиус,

3) продольный уклон поверхности потока,

4) шероховатость русла, от которой зависит коэфициент C.

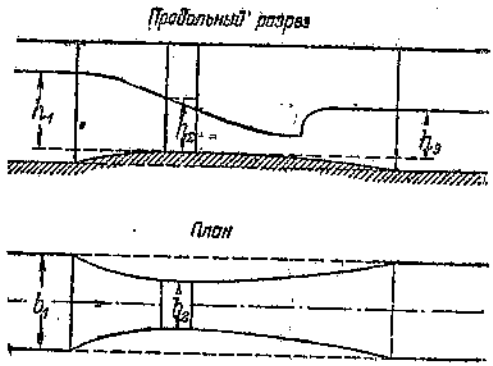


Рис. 216-а. Открытый водомер Вентури.

Эти формулы предполагают равномерное движение потока, почему их можно применять только на участках, удовлетворяющих этому условию (см. § 42). От степени выполнения его будет зависеть в значительной мере точность результата.

За площадь живого сечения на естественных потоках принимается средняя из нескольких площадей, определенных промерами глубин в разных пунктах участка. Из этих данных находится и средняя величина смоченного периметра и гидравлического радиуса. Так как поперечные профили вычерчиваются обычно в разных масштабах для глубин и расстояний, то величину смоченного периметра по ним нельзя измерить непосредственно и приходится находить вычислением. Если глубины невелики по сравнению с шириной потока, как это большей частью бывает (например, на широких реках), то без большой погрешности можно смоченный периметр заменить шириной реки, а гидравлический радиус — средней глубиной. Ошибка в этих случаях обычно не превосходит 2%.

С значительно меньшей точностью определяется уклон потока I и коэфициент *Шези* C. Продольный уклон получается при помощи нивелировки двух точек поверхности воды, расстояние между которыми L измеряется по берегу. В этих точках одновременно забиваются в уровень с поверхностью воды колья или делаются отсчеты по рейкам или сваям уклонных водомерных постов, применяя приспо-

собления, указанные в § 10. *Гарляжер* определял уклон нивелиром, делая отсчеты по вертикальной рейчке, плывущей по течению на поплавке.

При точных работах иногда применяется прибор *Амслера* (рис. 217), состоящий из двух стеклянных трубок, к которым присоединены длинные резиновые трубки с приемными камерами, опускаемыми на дно и открытыми снизу. Воздух из стеклянных труб отсасывается, как в трубке *Пито-Дарси* (§ 39), и разность уровней h отсчитывается по шкале.

Уклон I равен

$$I = \frac{h}{L}.$$

Уклонные водомерные посты на гидрометрических станциях обычно располагаются в равных расстояниях от рабочего створа, один выше, другой ниже по течению, нередко на обоих берегах, чтобы учесть средний уклон потока. Средний створный пост, связанный с уклонными, позволяет судить об однообразии уклона на участке между крайними постами.

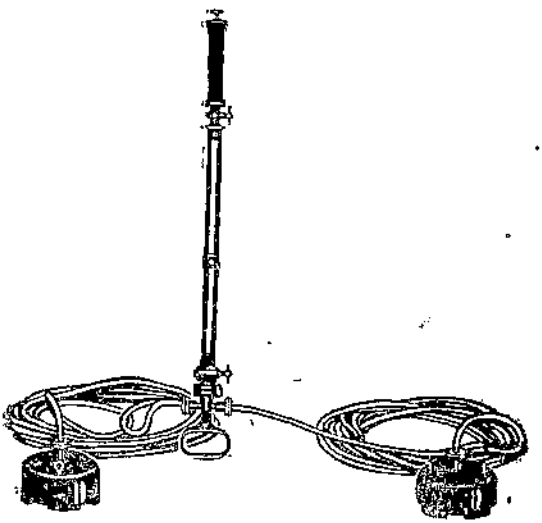


Рис. 217. Прибор Амслера для определения уклона.

На точность определения уклона влияет главным образом точность измерения разности уровней h, так как расстояние L может быть измерено весьма точно. Поэтому можно принять, что

$$dI = \frac{dh}{L}.$$

Если, например, I=0,0001 (0,1‰) и мы хотим определить уклон с точностью до 10% (dI = 0,00001), то при L = 1000 *м* необходимо измерить разность уровней h с точностью $dh = Ldl = 0{,}01$ *м*. Ошибка в определении h (величина dh) складывается из ошибки нивелировки, связывающей нули постов, и ошибки отсчетов высоты уровня воды по рейкам. На обыкновенных водомерных постах точность отсчета по рейке составляет около 0,01 *м*, так что такие посты в рассматриваемом случае были бы непригодны. Более сложные приспособления (см. § 10) позволяют делать отсчеты в лучшем случае с точностью до 0,001 *м*. Чтобы эта точность не была фиктивной, ошибка нивелировки не должна превосходить соответствующей величины, т. е. примерно $0{,}01 - 2 \cdot 0{,}001 = 0{,}008$ *м*.

Таким образом, в этом случае для определения уклона даже с 10% точностью потребовалась бы точная (прецизионная) нивелировка и приспособления для точного отсчета уровней.

По этой причине точное определение малых уклонов является весьма трудной и сложной задачей: с одной стороны, желательно увеличение расстояния L (но вместе с этим растет и ошибка нивелировки), с другой стороны — точность отсчетов высоты уровня тоже имеет свой предел. Помимо этого трудно найти длинный участок с однообразным на всем его протяжении продольным уклоном и поперечным сечением.

Еще более трудным является установление шероховатости русла для вычисления отвечающего истине значения коэфициента *Шези* C. Для последнего гидравлика, как известно, дает много формул, из которых наиболее употребительны:

полная формула *Гангийе-Куттера:*

$$C=\frac{23+\frac{1}{n}+\frac{0{,}00155}{I}}{1+\left(23+\frac{0{,}00155}{I}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}}; \qquad (141)$$

сокращенная формула *Гангийе-Куттера,* получающаяся из (141) для уклонов примерно $I > 0{,}0005$ (когда членами, содержащими I, можно пренебречь):

$$C=\frac{23+\frac{1}{n}}{1+\frac{23n}{\sqrt{R}}}; \qquad (142)$$

формула *Маннинга:*

$$C=\frac{R^{1/6}}{n}, \qquad (143)$$

и формула *Базена* (117):

$$C=\frac{87}{1+\frac{\gamma}{\sqrt{R}}}$$

(все формулы даны для метрических размеров).

Коэфициент шероховатости n, общий для первых трех формул, имеет разные значения для разных родов стенок. Для коэфициента шероховатости γ в формуле *Базена* существует своя шкала категорий шероховатости.

Эти шкалы дают для земляных каналов, смотря по состоянию стенок и дна, n в пределах от 0,018 до 0,040 и даже 0,050, γ от 0,85 до 1,75, для естественных русел — n от 0,025 до 0,050 и γ от 1,30 до 1,75.

По исследованиям *Хортона* для естественных русел значения n могут быть еще выше, достигая на каменистых, неправильных или очень заросших участках величин 0,080 и даже 0,150.

Кинг дает для коэфициента γ в формуле *Базена* следующую табличку, приведенную на стр. 189 (переведено из футовых мер в метрические).

Швейцарский инженер *Метлер,* на основании анализа большого числа расходов, определенных по измеренным скоростям, дает номограммы (1927 г.), позволяющие находить величины $\Omega_v = Hv_s$ (элементарные расходы на вертикалях) по известным глубинам, продольному уклону и шероховатости русла. По значениям Ω_v строится эпюра элементарных расходов, как при измеренных скоростях, а расход вычисляется обычным путем (по площади эпюры). При этом в расчет может быть

Род поверхности	Условия			
	лучшие	хорошие	средние	плохие
Земляные каналы в хорошем состоянии	0,50	0,69	0,88	1,05
Земляные каналы с растительностью, камнями и т. п.	1,05	1,38	1,74	2,10
Каналы, высеченные в скале	1,38	1,74	2,04	2,32
Естественные русла в хороших условиях	1,05	1,38	1,74	2,10
Естественные русла заросшие, каменистые и т. п.	1,74	2,43	3,48	4,86

введена разная шероховатость на разных участках поперечного профиля (например, для коренного русла и поймы).

Очевидно, правильный выбор коэфициента шероховатости весьма труден и проблематичен вследствие изменчивости этого коэфициента в поперечном профиле, а также по длине реки. Это обстоятельство, в связи с трудностью определения уклона и выбора правильного участка, делает и определение расхода этим способом мало надежным.

Определение коэфициентов шероховатости на каналах и характерных участках рек часто входит в задачу гидрометрических исследований. Для этого сначала определяются расход и средняя скорость потока, а затем продольный уклон и гидравлический радиус.

Тогда из формулы *Шези* (132):

$$C = \frac{V}{\sqrt{RI}}$$

и, например, по *Базену* (из 117)

$$\gamma = \left(\frac{87}{C} - 1\right)\sqrt{R}$$

или, подставляя сюда значение C,

$$\gamma = \left(\frac{87\sqrt{RI}}{V} - 1\right)\sqrt{R}. \qquad (144)$$

Иногда приходится приближенно оценивать наибольший возможный расход потока, когда уровень воды в нем стоит низко или даже в русле совсем нет воды. В этих случаях наибольший уровень, соответствующий максимальному расходу, выясняется из опроса местных жителей, на основании оставленных водой следов, меток и т. п. По этому горизонту подсчитывается площадь живого сечения и гидравлический радиус (на основании промеров глубин и нивелировки берегов). В предположении постоянства уклона последний измеряется при существующем уровне воды и вводится в дальнейшее вычисление расхода (что редко соответствует действительности). При неимении других данных такой грубый подсчет может иметь все же некоторую ценность.

При отсутствии воды в русле можно попытаться определить уклон дна и оперировать с этой величиной в вычислениях. Обычно пересыхающие потоки имеют значительные уклоны, измерение которых при наличии воды проще и легче, чем малых уклонов (большое падение на малом расстоянии).

Уклон дна с его неровностями представляет большей частью условную, весьма трудно определимую величину. Поэтому удобнее на основании результатов опытов и исследований попытаться связать крупность частиц ложа и его грунт с величиной донной или поверхностной скорости, а от последней перейти к средней скорости для всего сечения с помощью эмпирических коэфициентов (§ 47). Некоторые исследователи связывают крупность частиц дна непосредственно со средней скоростью течения.

Например, по данным *Унфенбаха:*

галька диаметром 27 *мм* начинает двигаться при поверхностной скорости	0,97	*м/сек.*
галька диаметром 54 *мм* — при скорости	1,62	„
камни объема 5 $дм^3$ при скорости	2,27	„
„ „ 34 $дм^3$ „ „	3,25	„

и т. д.

По данным *Дюбуа:*

мелкий песок начинает двигаться при средней скорости течения	0,162	*м/сек*
крупный „ „ „ „ „ „ „	0,216	„
мелкая галька „ „ „ „ „ „ „	0,312	„
средняя „ „ „ „ „ „ „	0,650	„
крупная „ „ „ „ „ „ „	0,975	„

Смотря по тому, какой крупности частицы или камни остались невынесенными, можно остановиться на том или другом значении скорости.

Основанные на этих цифрах подсчеты величины расхода можно рассматривать, разумеется, лишь как самую грубую прикидку.

§ 55. Определение расхода способами смешения и сравнительная точность методов. Определение расхода способами смешения существенно отличается от вышеописанных методов: эти способы не требуют ни промеров поперечного сечения, ни измерения скоростей или уклона. Они основаны на том факте, что при измерении расходов нам всегда приходится иметь дело с турбулентным движением, при котором происходит полное перемешивание частиц воды в потоке. Благодаря этому в реках мы наблюдаем такие явления, что даже при сравнительно медленном течении количество растворенных веществ и температура воды оказываются почти одинаковыми во всех точках поперечного сечения.[1] Чем больше степень турбулентности потока (число *Рейнольдса*), тем интенсивнее и быстрее происходит перемешивание. Если точность измерений вертушкой при этом быстро понижается, то, наоборот, для определения расхода способами смешения представляются наиболее благоприятные условия. Такие условия имеют место, например, в порогах, на горных реках, у водопадов, плотин, при выходе воды из турбинных камер и т. д.

Представим себе, что в поток в течение некоторого времени выпускается добавочный постоянный расход воды, в которой растворено какое-либо вещество с известной степенью концентрации, например, C *г/л* (граммов на литр), или, что то же, C *кг/м*^{3}. В некотором расстоянии ниже по течению, где будет достигнуто полное перемешивание раствора с водой потока, последняя будет иметь меньшую концентрацию c *кг/м*^{3}.

Если расход потока в этом месте есть Q и в воде до выпуска раствора уже содержится некоторое количество того же вещества,

[1] Конечно, на участках, где нет источников, вызывающих изменение количества растворимых веществ или тепла (притоки, выходы грунтовых вод, растворимые породы).

т. е. она имеет естественную концентрацию c_e, а расход выпускаемого раствора равен q, то очевидно:

$$Q \cdot c_e + qC = (Q + q)\, c,$$

что выражает одинаковость расхода растворенного вещества в месте выпуска раствора и там, где он перемешался с водой потока (при установившемся движении).

Отсюда

$$Q = q \frac{C - c}{c - c_e}. \qquad (145)$$

Концентрация c обычно ничтожна по сравнению с C (меньше одной тысячной), и ею в числителе можно пренебречь. Тогда

$$Q = q \frac{C}{c - c_e}, \qquad (146)$$

и для вычисления расхода потока нужно знать 4 величины: расход раствора, его концентрацию и концентрацию речной воды до и после перемешивания ее с раствором. Если поток в естественном состоянии не содержит вещества, выпускаемого в растворе, или же величиной c_e по сравнению с c можно также пренебречь, то

$$Q = q \frac{C}{c}. \qquad (147$$

При этом предполагается, что расход потока Q на участке от впуска раствора до места, где достигнуто полное перемешивание, остается неизменным.

Для изготовления раствора могут употребляться различные вещества. В США при определении расхода воды через турбины выпускался раствор анилиновой краски (эозина), а степень концентрации раствора измерялась при помощи *денвиметров:* взятая после перемешивания в потоке проба воды наливалась в стеклянный цилиндр до такой высоты, чтобы при рассматривании сверху окраска ее имела ту же густоту, что в другом цилиндре с известной концентрацией красящего вещества. Отношение высот жидкости в обоих цилиндрах равно обратному отношению концентраций краски. Этот способ носит название *колориметрического* (от латинского слова «колор» — цвет). Могут применяться и другие краски (метиленовая, флуоресцин) и более совершенные приборы для определения концентрации *(колориметры).*

Более распространено определение концентрации химическим путем, почему и самый метод определения расхода таким способом часто называется *химическим.*

В качестве растворимого вещества может употребляться серная кислота, гипосульфит, поваренная соль и пр. Поваренная соль является наиболее удобной и дешевой, почему ею и пользуются чаще всего. При этом применим как весовой, так и объемный анализ.

В первом случае пробы воды известного объема, взятые из потока, выпариваются и определяется вес осадка соли. На точность результатов влияет точность взвешивания осадка, количество которого, в связи с этим, должно быть не меньше некоторых определенных величин (около 0,001 *г*). Поэтому приходится или забирать большие

пробы или выпускать значительный расход раствора. Все операции по выпариванию и взвешиванию осадка требуют наличия специальной лаборатории, оборудованной точными химическими весами и другими приспособлениями.

Удобнее определить концентрацию проб объемным анализом, так называемым *титрованием*, которое основано на прибавке к испытуемому раствору другого раствора, вызывающего реакцию двойного разложения. По количеству прибавленного вещества, необходимого для полного разложения исследуемого раствора, можно вычислить концентрацию раствора. Титрование раствора хлористого натрия (поваренной соли) производится путем прибавления к нему раствора азотнокислого серебра, дающего осадок хлористого серебра. Этот способ, в общем достаточно точный и чувствительный, оказывается довольно сложным при наличии в воде органических примесей и также требует лабораторной обстановки.

По этим причинам в последнее время применяется почти исключительно *электрохимический* метод, основанный на измерении электрической проводимости раствора хлористого натрия. Для сильно разбавленных растворов электропроводимость, которая представляет величину, обратную сопротивлению, изменяется прямо пропорционально концентрации, т. е. количеству соли, растворенной в единице объема.

Если известна электропроводимость воды потока в естественном состоянии и после введения в нее раствора, то по этим данным нетрудно вычислить соответствующие концентрации, а следовательно и расход потока Q, так как расход раствора и его концентрация могут быть установлены по нашему желанию заранее. В этом способе все измерения могут быть произведены на месте и тут же получается результат. Необходимо только иметь в виду, что на электропроводимость сильно влияет температура воды, поэтому надо делать измерения при постоянной температуре, или же, наблюдая за ней, вводить поправки, которые легко вычисляются.

Определение электропроводности проб, взятых из потока, удобнее всего производится методом уравновешенного *мостика Уитстона*. Во избежание поляризации электродов лучше применять переменный ток от трансформатора T (рис. 218). Сосуд с двумя пластинчатыми электродами, в который налита исследуемая вода из потока, включается в одно плечо мостика, три остальных плеча представляют магазины сопротивлений или другие градуированные реостаты (a, b, c). В среднюю ветвь мостика включен чувствительный гальванометр e, крайние ветви соединены с источником тока, который может размыкаться ключом k.

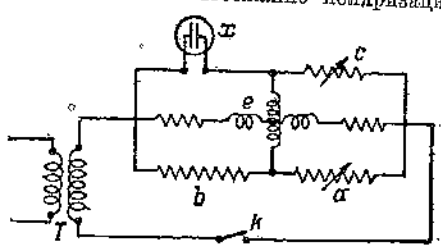


Рис. 218. Схема мостика Уитстона.

Употребление этого прибора заключается в следующем. В сосуд x забирается вода из потока до впуска в него раствора, и замыкается ключ k. В магазине a ставят определенное сопротивление, например 1000 ом, в b ставится также определенное сопротивление, зависящее от характера электродов и естественной проводимости воды потока (1000—5000 ом). Затем сопротивление c регулируется таким образом, чтобы в цепи гальванометра исчез ток.

Если теперь в сосуд x ввести воду из засоленного потока, то равновесие в мостике нарушится. Тогда, не трогая магазинов b и c, сопротивление a увеличивают до такой величины, чтобы стрелка гальванометра снова вернулась на нуль. Введенное добавочное сопротивление $\Delta a = (a - 1000)$ ом, очевидно, уравновешивает увеличение проводимости засоленной воды по сравнению с незасоленной и пропорционально ему, а следовательно и увеличению концентрации. При таком методе можно не считаться с естественной концентрацией воды в потоке и пользоваться формулой (147).

Удобно протарировать прибор следующим образом: поместив электроды в сосуд, содержащий N литров незасоленной воды, уравновесим мостик, как описано выше, и будем доливать в сосуд известные, очень небольшие количества того же раствора, который выпускается в поток, тщательно его размешивая и определяя после каждой прибавки ее предыдущему величину Δa. Этим путем можно добавить такое количество раствора, которое даст именно ту величину Δa, какая получилась при исследовании засоленного потока.

Однако лучше поступить несколько иначе: согласно сказанному выше,

$$\Delta a = k' c',$$

где c' — добавочная концентрация воды вследствие введения в поток раствора [$c - c_0$ в формуле 146)]. Зная полное количество добавляемого в сосуд раствора w, можно принять, что эта концентрация равна:

$$c' = C \frac{w}{W}, \qquad (148)$$

Следовательно

$$\Delta a = k' C \frac{w}{W} = k \frac{w}{W} = k \frac{c'}{C}, \qquad (149)$$

и тогда формула (146) может быть написана в виде:

$$Q = q \frac{k}{\Delta a}. \qquad (150)$$

Коэфициент k является для данного прибора в некоторых пределах, при неизменной температуре и концентрации начального раствора C, величиной постоянной. Определив его из зависимости (149):

$$k = \Delta a \frac{W}{w}$$

путем доливания некоторых количеств раствора w, можно легко вычислять расход по формуле (150).

Для того, чтобы обеспечить постоянство поступающего в поток расхода раствора, устраивается сосуд, из которого истечение происходит при неизменном напоре. Существует несколько типов сосудов такого рода (например, сосуды *Мариотта*, *Штромейера* и др.). Наиболее употребителен сосуд *Унвина* (рис. 219), в котором постоянство напора достигается при помощи водослива. Раствор поступает в этот сосуд из бака в количестве, немного превышающем постоянный расход раствора q, и излишек его сливается через водослив, откуда потом опять поступает в бак (например, при помощи насоса). Раствор поваренной соли берется близкий к насыщению (250—300 *г/л*), и обычно расход его составляет 2—3 *л/сек.* на 8—10 *м³/сек.* расхода потока.

Выпуск раствора производится в местах, обеспечивающих наилучшее перемешивание (перед перепадами, порогами, плотинами и т. п.),

---

Точнее $c' = C \frac{w}{W + w}$, однако малой величиной w по сравнению с W в знаменателе вполне можно пренебречь.

а взятие проб — ниже по течению, где концентрация проб получается одинаковой как в середине потока, так и у обоих берегов. Минимальное расстояние от места выпуска раствора до места взятия проб предварительно определяется опытным путем. Оно должно быть только

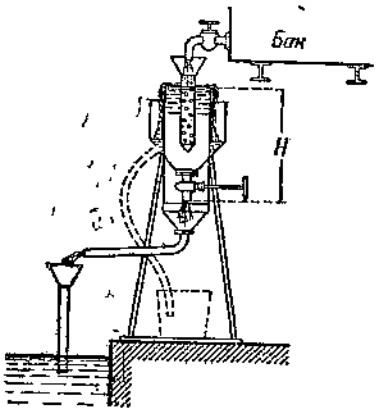


Рис. 219. Сосуд Уивина.

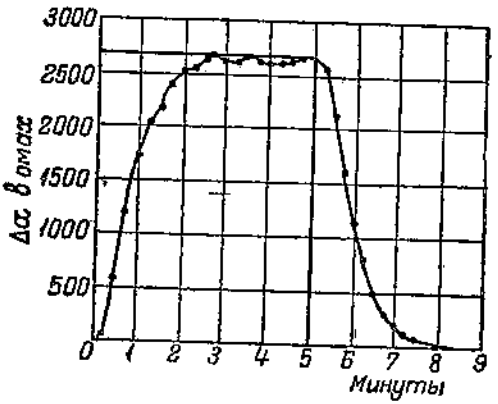


Рис. 220. Кривая $\Delta a = f(t)$ при достаточной продолжительности выпуска раствора.

достаточным для полного перемешивания, так как иначе придется непроизводительно увеличивать расход соли.

Когда место взятия проб установлено, нужно еще определить необходимую продолжительность выпуска раствора. При передвижении раствора вместе с потоком, в месте взятия проб концентрация (а также и величина Δa) изменяется, как показано на рис. 220: сначала концентрация возрастает до максимума, остается некоторое время почти постоянной, затем, с прекращением выпуска раствора, падает. Очевидно, минимальное время выпуска определяется временем, достаточным для установления устойчивого максимума концентрации. На рис. 221 показан случай, когда это время взято явно недостаточным.

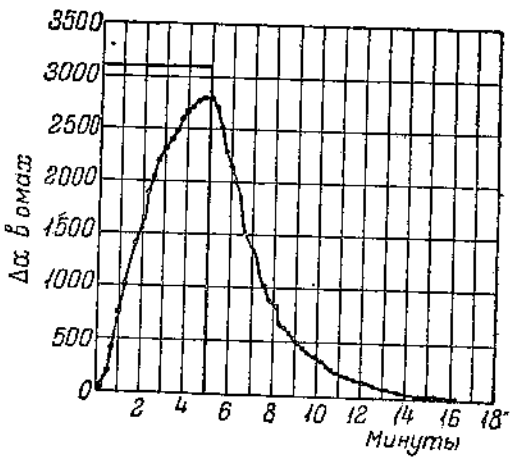


Рис. 221. Кривая $\Delta a = f(t)$ при недостаточной продолжительности выпуска раствора.

Так как иностранная практика ограничивалась применением этого метода к небольшим расходам (порядка до 10 $м^3/сек.$) и главным образом для определения расходов воды через турбины гидроустановок, то в 1912—1913 гг. были предприняты специальные исследования на Верхней Волге у Верхневолжского бейшлота (плотины), при расходах до 60 $м^3/сек.$

Исследования велись как химическим (объемным) методом, так и электрохими-

ческим, и показали полную пригодность их и в этих условиях. Пробы воды брались в расстояниях от бейшлота от 1400 до 4000 *м*, расход соли составлял около 11 *кг* на 1 *м*³/*сек*. расхода реки при продолжительности выпуска раствора от 50 до 100 минут. Расходы отличались от измеренных вертушкой на величину от 10% до нуля, в зависимости от выбранного расстояния, количества соли и точности методов определения концентраций.

Итальянский инженер *Барбаджелята* обратил внимание (1928 г.) на то, что если строится кривая $\Delta a = f(T)$, то нет необходимости поддерживать строго постоянный расход q выпускаемого раствора, а достаточно знать лишь общий объем его W.

Площадь кривой (рис. 220) в пределах от $t = 0$ (начало повышения концентрации в потоке) до $t = T$ (конец прохождения раствора) может быть выражена так:

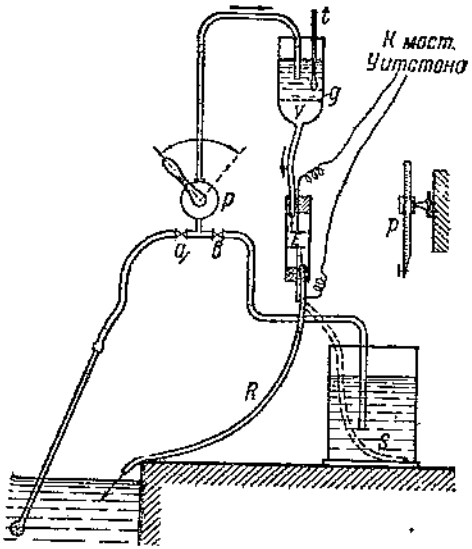


Рис. 222. Оборудование для определения расхода электрохимическим методом.

$$A = \int_0^T \Delta a\, dt.$$

Но из (150)

$$\Delta a = k\frac{q}{Q},$$

поэтому

$$A = \frac{k}{Q}\int_0^T q\, dt.$$

Так как

$$\int_0^T q\, dt = W,$$

то

$$A = \frac{k}{Q} W$$

и

$$Q = k\frac{W}{A}. \qquad (151)$$

Эта формула может быть применена и к тому случаю, когда раствор выпускался недостаточно длительно для того, чтобы концентрация воды потока достигла постоянного максимума, отвечающего расходу Q (рис. 221). Продолжительность выпуска раствора T_0 на кривых соответствует моменту, когда концентрация (или величина Δa) начинает падать.

При этом

$$\frac{W}{T_0} = q_{ср}$$

есть средний расход раствора и

$$Q = k\frac{q_{ср}}{\frac{A}{T_0}} = k\frac{q_{ср}}{\Delta' a},$$

где $\frac{A}{T_0} = \Delta' a$ есть высота прямоугольника площадью A с основанием, равным T_0.

Таким путем может быть уменьшено общее количество раствора W, которое для получения Δa_{max} (рис. 220) при больших расходах Q могло бы быть весьма значительным, обусловливая главный недостаток метода. Раствор может выпускаться в поток при помощи ручного насоса или двумя рабочими, выливающими его поочередно ведрами.

Устройство для определения величин Δa может иметь вид, показанный на рис. 222. Вода забирается из потока ручным насосом P при открытом кране a и закрытом b, циркулируя между электродами E, соединенными с мостиком *Уит-*

стона, и возвращаясь гибким шлангом R в поток. Между насосом и электродами помещен открытый сосуд V, способствующий удалению пузырьков воздуха и снабженный сеткой g и термометром t. Накачивание воды производится более или менее равномерно, поддерживая в сосуде V постоянный уровень. После прохождения раствора в потоке и определения достаточного числа точек для построения кривой $\Delta a = f(t)$ шланг R перекидывается в сосуд S, куда набирается достаточный объем воды потока для определения постоянной прибора k. Затем кран a закрывается, открывается кран b и тем же насосом через электроды прогоняется вода из сосуда S, при этом из бюретки p в сосуд S постепенно добавляются небольшие определенные количества раствора, как было описано выше.

Наконец, возможен *тепловой* способ определения расхода по принципу смешения. Допустим, что в значительный поток впадает небольшой приток, температура воды которого сильно отличается от температуры в главном потоке. Такой случай представляется, например, при наличии горячих ключей или ледникового питания потока.

Пусть расход одного потока равен Q_1 и температура воды t_1, другого — соответственно Q_2 и t_2. После слияния расход $Q = Q_1 + Q_2$ и температура t. Тогда

$$Q_1 t_1 + Q_2 t_2 = (Q_1 + Q_2)\, t.$$

Если измерить каким-либо образом меньший расход (что может быть просто при незначительной величине его), то другой расход определится из равенства:

$$Q_1 = Q_2 \frac{t - t_2}{t_1 - t}$$

и общий расход:

$$Q = Q_2 \left(1 + \frac{t - t_2}{t_1 - t}\right) = Q_2 \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t}. \qquad (152)$$

Методы смешения, в частности химические методы, надлежащим образом усовершенствованные (электрохимический метод), имеют много очевидных преимуществ перед другими методами определения расходов.

Для их применения не требуется длинного прямолинейного участка потока с равномерным движением, длительных измерений скоростей и глубин и сложной обработки результатов. Они годятся для закрытых водопроводов и открытых русел, будучи в конечном счете мало ограничены даже скоростями движения воды. Необходимым и обязательным условием является только хорошее перемешивание вводимого раствора с массой воды потока, что может быть затруднительным в больших потоках со спокойным течением. Но и здесь возможно некоторое улучшение условий выпуска раствора и его перемешивания, например путем употребления труб, с мелкими отверстиями, введения раствора в нескольких местах по ширине потока и т. п.

Точность определения расхода может быть достигнута не меньшая, чем при измерениях вертушкой, а в некоторых случаях и гораздо бо́льшая (в очень турбулентных потоках). Наконец самый процесс измерения совершается весьма быстро (на Верхней Волге около часу), что также имеет большое значение.

Сравнительная точность различных методов измерения расходов исследовалась в 1922 г. на отводящем канале Амстегской гидроэлектрической станции (в Швейцарии) при изменении расходов в пределах от 1,2 до 4,4 *м³/сек*. Расходы, вычисленные по разным формулам для водослива и определенные химическим методом и вертушками, сравнивались с расходами, полученными объемным способом, и дали следующие средние отклонения от последнего:

1545

водослив	от	$-0{,}15\%$ (ф-ла *Ребока*)
	до	$+1{,}4\%$ (ф-ла *Базена*)
химический метод		$+0{,}3\%$
вертушки		$+0{,}9\%$.

Весьма обстоятельные исследования производились в 1930 г. Мюнхенским институтом гидротехники на бетонном канале Вальхензее, шириной 2,5 *м* и глубиной 2 *м*, при расходах от 0,5 до 4,0 *м*^{3}*/сек*. Они позволяют сопоставить 4 метода: объемный (основной), вертушечный, метод солевого экрана и химический. Отклонения от расходов, полученных объемным способом, оказались следующие (в процентах):

	Число опытов	Среднее отклонение	Пределы отклонений
Вертушка *Отта* V (спицевые лопасти)	22	$-0{,}56$	от $-3{,}2$ до $+1{,}8$
Вертушка *Отта* (винтовые лопасти)	22	$-0{,}30$	„ $-1{,}6$ „ $+1{,}0$
Метод солевого экрана	38	$-1{,}14$	„ $-3{,}6$ „ $+2{,}9$
Химический метод (1-й способ) . .	26	$+0{,}03$	„ $-2{,}9$ „ $+2{,}3$
„ „ (2-й способ) . .	26	$+0{,}06$	„ $-1{,}7$ „ $+1{,}5$

(При химическом методе по 1-му способу средняя концентрация соли в сечении определялась как арифметическое среднее из концентраций в 15 точках, по 2-му способу — из расходов соли в тех же точках, т. е. с учетом скоростей течения).

Приведенные цифры показывают хорошую точность всех методов, возможную, конечно, лишь в особо благоприятных условиях (правильный канал, аппаратура высокого качества, квалифицированный персонал и пр.).

§ 56. Определение расхода воды в трубопроводах. Из предыдущего уже ясно, что для определения расходов воды в напорных трубопроводах значительных диаметров (в частности в трубопроводах гидроэлектрических станций) могут применяться разнообразные методы.

Наиболее точный объемный способ для промежуточных сечений трубопровода почти неприменим ввиду технических трудностей и того, что давление в трубопроводе отличается от атмосферного; вследствие этого выпуск воды в мерный бак повлек бы за собой изменение расхода воды. Неприменимы также всякого рода поплавки (за исключением «солевого экрана» — § 24) и устройства вроде водяных дюймов, модулей и водосливов, действующие при атмосферном давлении (§ 53).

Метод определения расхода воды по площади поперечного сечения и продольному уклону потока вполне применим к трубопроводам постоянного сечения, если в расчет вводить пьезометрический уклон, получаемый по разности давлений (манометрических высот) в двух сечениях, однако, как и для открытых русел, он не обеспечивает

необходимой точности результата, главным образом вследствие трудности назначения правильной величины коэфициентов шероховатости.

Из прочих методов, освещенных в предыдущем изложении, наиболее употребительны:

1) определение расхода по скоростям, измеренным вертушкой (реже — трубками *Пито*, сферическим зондом),

2) метод солевого экрана *Аллена* и

3) способы смешения (химический и электрохимический).

Применение вертушек специальных конструкций (§ 26), как передвижных, так и неподвижно закрепленных в трубопроводе, широко практикуется в Западной Европе. На рис. 223 показано устройство *Дюфура-Отта*, позволяющее измерять скорость по двум взаимно перпендикулярным диаметрам при помощи двух вертушек на выдвижных штангах *g*. Вертушки могут быть установлены в работающий трубопровод и вынуты из него путем «шлюзования» через колонку *B*, которая снабжена задвижкой *A*, крышкой *C* и заслонкой *D*, передвигаемой штангой *E*. Это устройство рассчитано на давление в трубе до 5 *ат* (напор 50 *м*); более сложные устройства этого типа предусматривают давления до 35 *ат* (350 *м*).

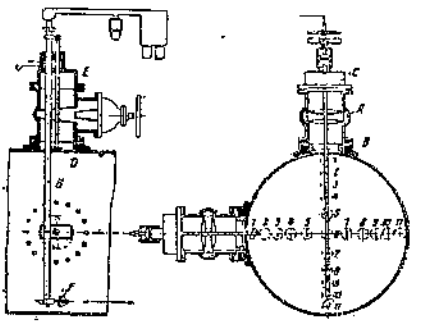


Рис. 223. Устройство Дюфура-Отта.

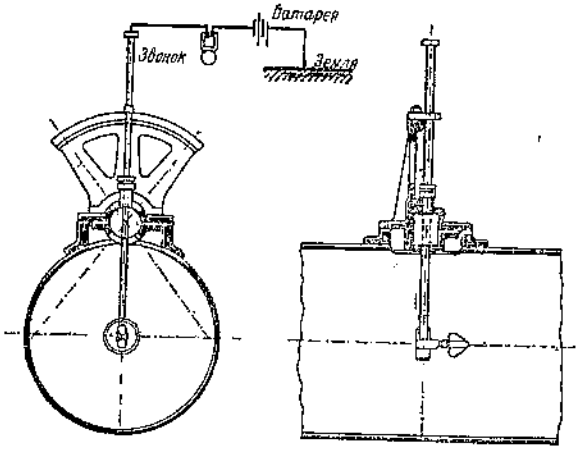


Рис. 224. Устройство по Сундби.

В другой конструкции (*Сундби*), изображенной на рис. 224, вертушка, снабженная защитным кольцом, может устанавливаться в любой точке сечения благодаря цилиндрическому вкладышу, позволяющему штанге поворачиваться в плоскости поперечного сечения трубы. В устройстве *Бевинга-Отта* ряд вертушек укреплен на штанге-диаметре, которая может поворачиваться на оси, совпадающей с осью трубы.

Для вычисления расхода по измеренным скоростям строятся изотахи в сечении и применяется метод *Кульмана.*

Постоянная вертушка, установленная на оси трубопровода, показана на рис. 225. Здесь для определения расхода необходимо знать соотношение между средней скоростью в сечении и скоростью на оси трубы, которое может быть принято постоянным для всех расходов и получается из сравнения показаний постоянной вертушки с резуль-

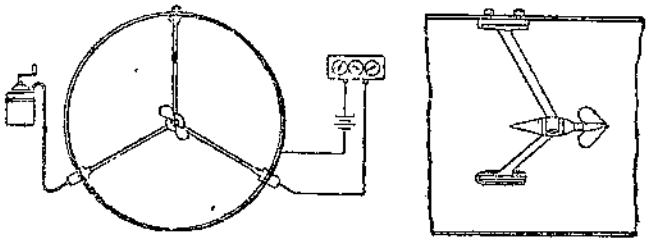


Рис. 225. Постоянная вертушка в трубопроводе.

татами однократного измерения скоростей в ряде точек в соседнем профиле. Такая вертушка может служить водомером и быть присоединенной к самопишущему прибору.

Применение для измерения скоростей и расхода сферического зонда уже было освещено в § 39. По той же схеме в трубопровод могут вводиться и трубки *Пито.* На показания приборов этого типа заметное влияние оказывает степень турбулентности потока, почему практика относится к ним с известной осторожностью.

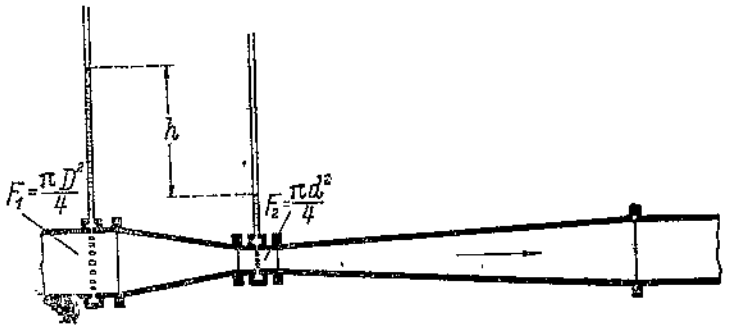


Рис. 226. Схема водомера Вентури.

Сущность солескоростного метода *Аллена,* равно как и родственных ему способов смешения, также уже рассмотрена в предыдущем изложении (§ 24, 40, 55).

К числу специфических методов для трубопроводов, основанных на применении гидравлических формул и не упоминавшихся ранее, относятся методы *Вентури-Герщеля* и *Гибсона.*

Водомер *Вентури,* изобретенный американцем *Герщелем* в 1881 г., нашел чрезвычайно широкое и разнообразное применение (для разных жидкостей, газов) и особенно удобен для измерения больших расходов воды. Он представляет весьма простое устройство, схематически

показанное на рис. 226. В суженном сечении трубы скорость увеличивается, а давление соответственно падает. Расход воды связан с падением давления формулой

$$Q = AF_1\sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2 - 1}} = C\sqrt{h}, \qquad (153)$$

где постоянный коэфициент A, зависящий от сопротивлений, обычно колеблется в пределах 0,7—0,99.

Чем сильнее сужение трубы, тем больше разность уровней h в пьезометрах и, следовательно, тем точнее отсчет, но тем больше и потеря напора в трубопроводе, для уменьшения которой особое внимание уделяется плавности очертания расходящегося участка водомера. Известны случаи применения водомера *Вентури* на трубопроводах диаметром свыше 5 *м*, металлических и железобетонных. На гидроэлектрических станциях это устройство может включаться в основной трубопровод, в ответвления к отдельным турбинам или в специально устраиваемые параллельные ответвления. Постоянная C лучше всего определяется тарировкой. При хорошем выполнении водомер может давать точность определения расхода порядка 1%, причем возможна также автоматическая запись.

Метод *Нормана Гибсона*, опубликованный в 1923 г., позволяет весьма быстро и точно определять расходы воды в напорных трубопроводах, снабженных затворами, в частности в трубопроводах гидроэлектрических станций, расход воды в которых может быть быстро уменьшен до нуля или незначительной величины путем закрытия лопаток направляющего аппарата турбины. Основанный на теории *«гидравлического удара»*, этот метод, несмотря на сравнительную новизну, уже превратился в стандартный при производстве приемных испытаний гидростанций в США и за последние годы находит все большее применение в Европе.[1]

Если M — масса воды, заключенной в трубопроводе,

V — средняя скорость в трубопроводе до начала закрытия затвора,

V_1 — средняя скорость после закрытия, равная или близкая к нулю,

Δp — повышение давления (на единицу площади поперечного сечения),

T — продолжительность закрытия затвора,

F — площадь поперечного сечения трубопровода, — то, на основании закона количества движения,

$$M(V - V_1) = F\int_0^T \Delta p\, dt. \qquad (154)$$

Но

$$M = \frac{\gamma}{g} LF$$

(γ — вес единицы объема воды, g — ускорение силы тяжести, L — длина трубопровода),

[1] По методу *Гибсона* в 1934 г. производилось определение расхода воды в напорных трубопроводах Днепровской ГЭС имени *Ленина* во время приемных испытаний турбин.

Поэтому из уравнения (154):

$$V = \frac{g}{L} \int_0^T \frac{\Delta p}{\gamma} dt$$

и

$$Q = FV = \frac{gF}{L} \int_0^T \frac{\Delta p}{\gamma} dt. \qquad (155)$$

Если во время закрытия затвора (направляющего аппарата турбины) регистрировать самопишущим прибором изменение давления $\frac{\Delta p}{\gamma}$, то площадь полученной диаграммы и будет давать в некотором

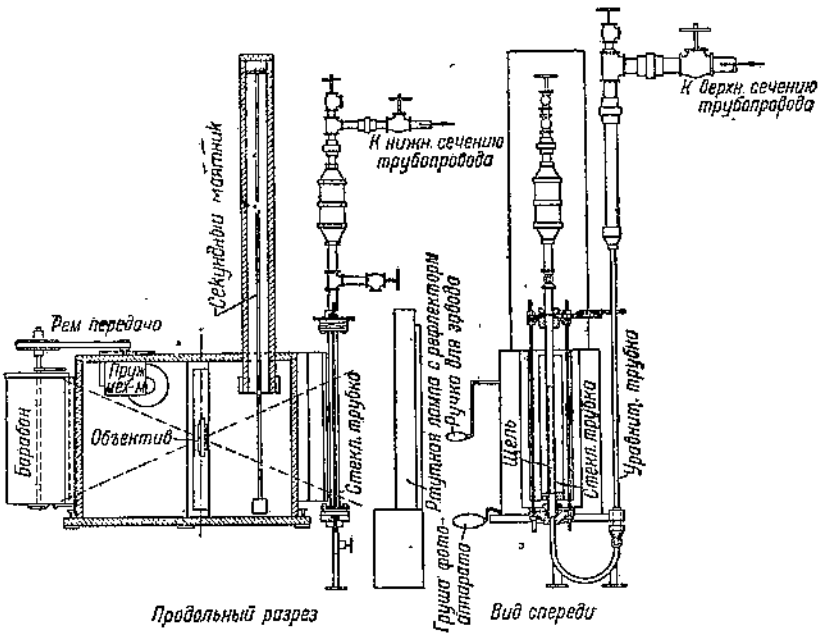


Рис. 227. Схема прибора Гибсона.

масштабе величину интеграла, входящего в формулу (155). Сконструированный *Гибсоном* прибор позволяет получить эту диаграмму фотографическим путем.

Схема прибора *Гибсона* изображена на рис. 227. В одну ветвь U-образного ртутного манометра, концы которого могут присоединяться к двум сечениям трубопровода, вставлена стеклянная трубка, расположенная против щели фотокамеры и освещаемая с другой стороны ртутной лампой. Другая ветвь манометра представляет стальную «уравнительную» трубку, сечение которой подбирается таким образом, чтобы колебания столба ртути в стеклянной трубке не выходили за пределы щели фотокамеры.

В фотокамере помещается объектив, а в задней ее стенке — вторая щель с затвором. К ней примыкает барабан, внутри которого нахо-

дится цилиндр, обернутый светочувствительной пленкой и вращающийся от пружинного механизма при помощи ременной передачи. На пленке получается изображение столба ртути в натуральную величину и вертикальные темные линии от секундного маятника, качающегося перед объективом, дающие масштаб времени.

Обычный вид получаемой диаграммы показан на рис. 228. В расчет вводится площадь диаграммы от начала повышения давления (начало закрывания затвора) до полного закрытия затвора (когда начинаются правильные затухающие колебания давления), ограниченная снизу линией, соединяющей начальное давление и среднее

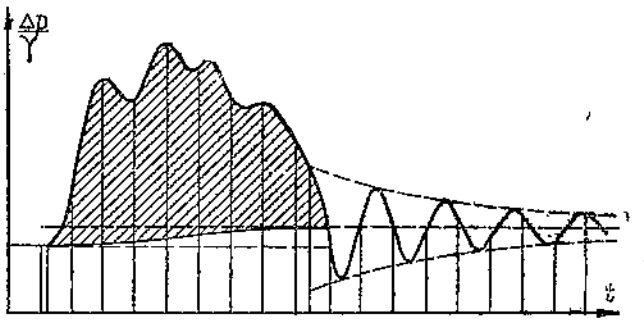


Рис. 228. Диаграмма изменения давления в трубопроводе.

давление после закрытия затвора. При этом делается ряд поправок (на ширину щели, постепенное уменьшение скорости в трубопроводе, усадку фотобумаги) и устанавливается масштаб площади диаграммы.

При «простом» методе *Гибсона* ветвь манометра со стеклянной трубкой присоединяется к одному сечению трубопровода, а уравнительная трубка остается открытой, и в расчет вводится вся масса воды в трубе выше взятого сечения. При «дифференциальном» методе манометр соединяется с двумя сечениями, и в расчет входит масса воды между ними.

Точность метода весьма высока: в ряде случаев произведенных сравнительных измерений средние отклонения от расходов, определенных другими точными методами, не превосходили 0,5%.

ГЛАВА IV

УСТАНОВЛЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ РАСХОДАМИ И УРОВНЯМИ В ОТКРЫТОМ РУСЛЕ И ВЫЧИСЛЕНИЕ СТОКА

§ 57. Кривая расходов и кривые площадей и средних скоростей живого сечения. Как указывалось в § 1 и видно из тл. III, определение расхода потока представляет довольно сложную операцию; поэтому для получения ежедневных (среднесуточных) расходов и последующего вычисления стока, т. е. суммарного количества воды, протекшего за некоторый промежуток времени (сутки, декада, месяц и т. д.), расходы измеряются не каждый день, а периодически, с таким расчетом, чтобы выяснить их связь с уровнями, т. е. установить, какой расход Q соответствует любому горизонту воды в потоке H. Тогда не трудно перечислить показания уровня на водомерном посту в расходы и получить таблицы или графики, аналогичные рассмотренным в гл. I (приложение 4 и рис. 37) для уровней.

Согласно основной зависимости для равномерного движения (140), имеем равенство:

$$Q = \omega V = \omega C \sqrt{RI}.$$

При надлежащем выборе участка (§ 42) с устойчивым руслом и движением, близким к равномерному, можно принять, что шероховатость русла и продольный уклон потока остаются неизменными, независящими от положения горизонта. Тогда величины ω, C и R всецело определяются высотой стояния уровня воды H, и можно написать:

$$Q = F(H). \qquad (156)$$

Видом этой функции и определяется связь между расходами потока и уровнями воды или зависимость первых от последних, графическое выражение которой мы будем в дальнейшем называть просто *кривой расходов*.

В природных условиях, как уже неоднократно отмечалось, мы не можем обеспечить строгого постоянства вышеуказанных входящих в выражение (140) величин (уклона и шероховатости) или хотя бы того, чтобы и они являлись однозначными функциями горизонта воды. Особенно это относится к уклону I: при проходе паводков (рис. 229) одному и тому же уровню по рейке H во время подъема воды будут соответствовать уклоны I_1 больше нормального, во время спада — I_2 меньше нормального.

Уже по одному этому, если мы будем накладывать в прямоугольных координатах H и Q точки, соответствующие каждому измерению расхода, то они не лягут на одну плавную кривую (см. ниже), а образуют неправильную линию или криволинейную полосу, более или менее тесно определяющую положение некоторой средней кривой. Чем менее выдержаны условия, при которых применима формула (140), тем более неопределенную кривую и большее рассеяние дадут наложенные точки.

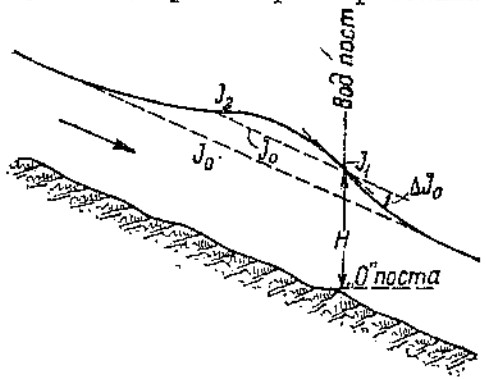


Рис. 229. Продольный профиль паводочной волны.

Помимо этого, точки будут разбрасываться и вследствие ошибок измерений, обработки и накладки. Чтобы обнаружить ошибки этого рода, необходимо предварительно исследовать и проверить каждое измерение расхода, особенно для точек, значительно отклоняющихся от намечаемой кривой. Так как каждая точка при определении расхода наиболее употребительными методами (поплавками, вертушкой, батометром) есть результат измерения двух элементов — площади поперечного сечения и скоростей, то удобнее всего проверить ее положение путем исследования в отдельности площади живого сечения и средней скорости в нем в зависимости от высоты уровня, рассматривая значения расхода как произведение этих двух составляющих.

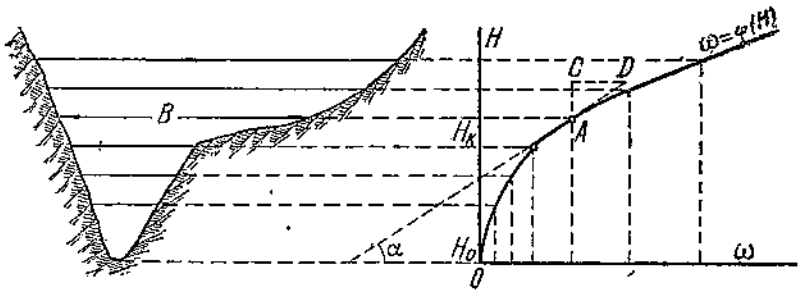


Рис. 230. Кривая $\omega = \varphi(H)$.

Таким образом, наряду с кривой расходов (156), если таковая не дает ясно выраженной однозначной зависимости, полезно рассмотреть кривые:

$$\omega = \varphi(H) \tag{157}$$

и

$$V = f(H) \tag{158}$$

Часто кривую расходов приходится устанавливать по весьма малому числу точек (несколько единичных измерений). В этом случае, хотя самое проведение кривых обычно и проще, но надо иметь

в виду, что оценить соответствие таких кривых действительности очень затруднительно, и потому анализ и проверка отдельных измерений приобретают еще большее значение.

Кривая площадей живого сечения строится (рис. 230) путем откладывания по оси ординат высот уровня воды на водомерном посту H, а по оси абсцисс — соответствующих площадей ω. Эти данные получаются в результате каждого определения расхода. Та же кривая может быть построена на основании промеров створного сечения и вычерченного его профиля, путем вычисления величин ω для каждого горизонта H, например, через определенные интервалы ΔH.

При правильном очертании профиля и кривая получается плавная; в местах резкого изменения сечения (горизонт $H_к$) ломается и кривая. Последняя начинается на уровне самой глубокой точки дна, при некоторой отметке горизонта H_0, и показывает непрерывное увеличение площадей с повышением горизонта.

Наклон кривой к оси абсцисс в любой точке A определяется выражением:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{dH}{d\omega} = \frac{1}{B}$$

(так как $d\omega = B \cdot dH$), где B — ширина потока при соответствующем горизонте. Так как последняя в обычных условиях всегда увеличивается с повышением уровня воды, то угол α при этом уменьшается, иначе говоря, кривая обращена выпуклостью к оси ординат. Только в одном случае — если $B = \text{const}$, т. е. русло прямоугольное, кривая превращается в прямую линию. Обратная кривизна, т. е. выпуклость кривой в сторону оси абсцисс, может иметь место, как исключительный случай, при уменьшении ширины с повышением уровня, например, при нависающих берегах в пределах отрицательных откосов (рис. 231).

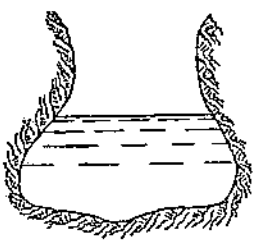


Рис. 231. Поперечный профиль с нависающими берегами.

Из того же выражения, полагая $dH = 1$, получим $d\omega = B$. Следовательно, имея точку A (рис. 230) с координатами ω и H и зная ширину B, можно найти и направление кривой в этой точке. Для этого надо построить прямоугольный треугольник ACD, у которого вертикальный катет равен единице в масштабе H, а горизонтальный равен B в масштабе ω. Гипотенуза AD даст направление касательной к кривой в точке A.

Такие построения могут быть уместны при установлении кривой $\omega = \varphi(H)$ по отдельным точкам, данные для которых берутся из ведомости определений расходов. У начала координат кривая касательна к оси H, если для самой глубокой точки профиля $B = 0$, и образует к ней некоторый угол, если дно горизонтально (например, при трапецоидальном профиле).

Если русло потока не остается неизменным, то и кривая с течением времени будет перемещаться, и данные разновременных промеров не дадут однозначной зависимости $\omega = \varphi(H)$. Если же русло отличается постоянством, то выскакивающие точки укажут на ошибки измерений или подсчетов.

Кривая средних скоростей $V = f(H)$ строится по значениям $V = \frac{Q}{\omega}$ и горизонтам воды H для каждого определения расхода. На вид этой кривой, как это следует из формулы *Шези* (132):

$$V = C\sqrt{RI},$$

оказывают влияние шероховатость русла, продольный уклон водной поверхности и гидравлический радиус. Кроме того, определяя V через Q и ω, мы вводим сюда и ошибки измерения скоростей и глубин и обработки измерений. Поэтому контролировать произведенные измерения по этой кривой значительно труднее, особенно ввиду сказанного выше о фактическом непостоянстве уклона. Тем не менее, некоторые грубые ошибки могут быть обнаружены и при ее помощи, так как при постоянстве шероховатости, уклона и очертания русла она должна давать для V плавную однозначную зависимость.

Если заменить гидравлический радиус R средней глубиной потока H' (что вполне допустимо для большинства рек, где ширина в десятки и сотни раз больше глубины) и считать I и C постоянными в некоторых пределах колебаний уровня, то для неразмываемого русла:

$$V = kH'^{1/2}, \qquad (159)$$

т. е. получаем уравнение параболы 2-й степени с вертикальной осью H' (рис. 232).

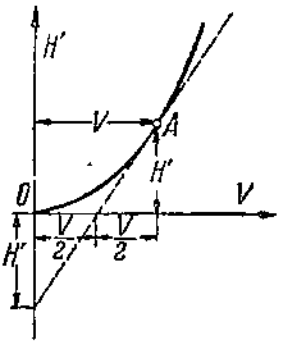


Рис. 232. Кривая $V = f(H)$.

Наклон ее в любой точке A с координатами H' и V:

$$\frac{dV}{dH'} = \frac{k}{2H'^{1/2}} = \frac{V}{2H'}$$

[так как из (159) $k = \frac{V}{H'^{1/2}}$], причем касательная отсекает на горизонтальной оси отрезок $\frac{V}{2}$, а на вертикальной — H'.

Средняя глубина H' при этих условиях выражается однозначно через высоту уровня H (так как $H' = \frac{\omega}{B}$), а кривая касательна к оси V в начале координат. В действительных условиях нередко расход воды равен нулю, когда глубина и площадь живого сечения имеют некоторые значения больше нуля (имеется мертвое водное пространство), и тогда кривая скоростей может изменить кривизну в нижней части на обратную, имея выпуклость в сторону оси H и пересекая последнюю на уровне нулевого расхода.

Построение кривых площадей и средних скоростей, как вспомогательных для кривой расходов, является общепринятым в США, но часто применяется и у нас. Все кривые строятся на одном чертеже, имея общую ось ординат H, а абсциссы их связаны уравнением (140): $Q = \omega V$ (рис. 233).

Масштабы выбираются с таким расчетом, чтобы среднее направление кривых составляло к осям не слишком острые углы (порядка 40—50°).

Так как ω растет пропорционально некоторой степени глубины, причем эта степень обычно больше единицы (равна единице для прямоугольного русла), V же зависит от глубины в степени, которая больше нуля, то расход Q, равный произведению ωV, есть функция глубины (а следовательно и уровня) в степени, всегда большей еди-

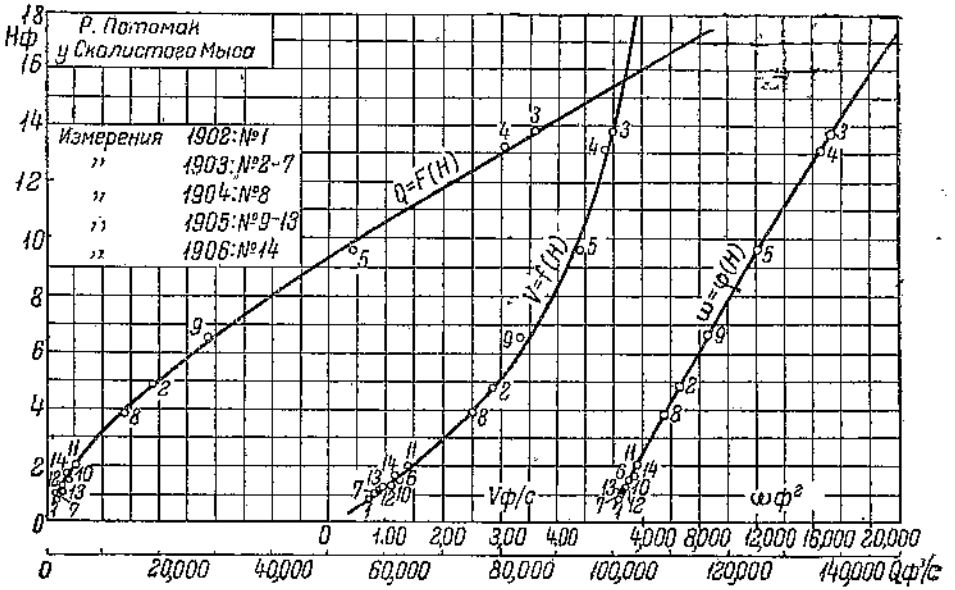


Рис. 233. Кривые $Q = F(H)$, $\omega = \varphi(H)$ и $V = f(H)$.

ницы, т. е. выражается кривой, обращенной выпуклостью вверх (к оси H).

§ 58. Методы установления кривой расходов. Графические методы. Можно итти разными путями в установлении кривой расходов: 1) чисто *графическим* методом, нанося точки измерений (как только что указывалось) и проводя плавную среднюю кривую, 2) *аналитическим* методом, подбирая уравнение кривой (156), наилучшим образом удовлетворяющее имеющимся данным, и 3) смешанным, *графо-аналитическим* методом, сочетая графические построения с определением вида уравнения кривой.

Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Графические методы выгодно отличаются от аналитических своей простотой, тогда как последние всегда связаны с довольно сложными вычислениями. В то же время графическое установление кривых всегда связано с некоторым субъективизмом, при котором возможны близкие, но не вполне тождественные решения, получаемые разными лицами, обрабатывающими данные.

С другой стороны, графические построения, будучи более гибкими, позволяют в некоторых случаях обнаружить и уловить характерные особенности кривой, например переломы ее при неправильном очертании живого сечения потока. При аналитическом методе искомая связь между расходами и уровнями укладывается в наперед задан-

ное уравнение кривой того или иного вида, соответствующее общим предпосылкам о виде кривой. Кривая, так сказать «вписывается» в это уравнение путем подбора наиболее подходящих параметров (постоянных) уравнения. Этим путем можно находить уравнение кривой, даже не прибегая ни к каким графическим построениям, однако и в этом случае сопоставление на чертеже найденной кривой и наложенных точек измерений дает наглядное представление об удовлетворительности решения.

Поэтому при всех методах установления зависимости между расходами и уровнями такое графическое сопоставление необходимо. При его помощи иногда можно обнаружить явное несоответствие принятого уравнения кривой с действительным характером исследуемой зависимости; это особенно важно, если надо пользоваться полученным уравнением для *экстраполяции*, т. е. определения расходов вне амплитуды действительных измерений (по уровням, выходящим за пределы наивысшего и наинизшего уровней, при которых измерены расходы).

По этим соображениям на практике обычно отдается предпочтение графическим и графоаналитическим методам.

Существует несколько приемов графического установления кривой расходов:

1) по всем точкам действительных измерений,
2) по центрам тяжести групп точек,
3) путем построения параболы и поправок к ней,
4) при помощи вспомогательной кривой

$$\omega\sqrt{R} = \psi(H), \tag{160}$$

5) в логарифмических масштабах.

Во всех случаях необходимо сначала установить подходящие масштабы координат, чтобы вся кривая поместилась на чертеже, располагаясь, как уже указывалось, приблизительно под углом 45° к осям.

Первый способ наиболее прост и применим, когда точек мало и они хорошо ложатся на плавную кривую (см. рис. 233). Последняя сначала проводится на-глаз, а затем окончательно по лекалу.

Если точек много и они ложатся широкой и неправильной полосой, то удобнее разбить их на несколько групп, заменив каждую группу одной точкой, расположенной в центре тяжести группы. Координаты центра тяжести находятся как среднее арифметическое из горизонтов и расходов всех точек, входящих в группу, и по ним наносятся на чертеж точки, каждой из которых приписывается вес, равный числу точек в группе.

Объединение точек в группы может быть сделано по чертежу, если отдельные группы намечаются сами собой. Если же точки располагаются более или менее равномерно, то можно произвести разбивку на группы через равные расстояния (интервалы) по оси ординат (горизонтов), разбив все точки на 5—10 групп. Величины интервалов удобно округлить, намечая их границы так же, как это делалось при построении кривых частоты и обеспеченности уровней (§ 15). Через построенные таким образом центры тяжести групп точек и проводится плавная кривая расходов.

Если и после замены всех точек центрами тяжести проведение плавной кривой затруднительно, то можно построить подходящую параболу по способу, излагаемому ниже. Применение этого способа удобнее всего разобрать на примере.

Допустим, что имеется серия измеренных расходов, расположенных в прилагаемой табличке в порядке возрастания горизонтов.

№ по пор.	№№ расходов	H м	Q м³/сек	№№ интервалов	$H_{ср}$ м	$Q_{ср}$ м³/сек.	Отклонения см
1	11	0,83	2,22				
2	10	0,91	2,68	1	0,87	2,46	0,00
3	9	1,08	3,87				
4	8	1,19	4,71	2	1,135	4,29	+ 0,20
5	7	1,29	5,33				
6	6	1,38	6,38	3	1,335	5,86	— 0,05
7	5	1,49	7,72				
8	4	1,59	8,94	4	1,54	8,33	+ 0,10
9	15	1,62	10,49				
10	3	1,69	10,38				
11	14	1,73	11,36	5	1,71	11,06	+ 0,35
12	2	1,80	12,02				
13	13	1,84	12,21				
14	12	1,87	13,56	6	1,855	12,89	— 0,10
15	1	2,31	22,01	8	2,31	22,01	+ 0,05

На рис. 234, сообразно с амплитудами H и Q, установлены масштабы: вертикальный — 0,1 м в 0,01 м и горизонтальный — 1,25 м³/сек. в 0,01 м. Интервалы горизонтов взяты через 0,2 м, всего 8 интервалов. Для них в таблице вычислены средние арифметические значения $H_{ср}$ и $Q_{ср}$, причем в 7-й интервал не попадает ни одного расхода. Точки, соответствующие измерениям, обозначены на чертеже черными кружками, центры тяжести — пустыми кружками, при которых (в скобках) поставлен их вес.

Графическое *построение параболы* (второго порядка) производится следующим образом. Проведем сначала на-глаз плавную кривую (на чертеже не показана), которая проходила бы возможно ближе к полученным центрам тяжести, и отметим точки пересечения ее A, B и B (двойные кружки) с тремя равноотстоящими друг от друга по высоте горизонтальными линиями (первая, вторая и третья линии), из которых нижняя проведена через границу первого и второго интервала, а верхняя — через границу предпоследнего и последнего. По полученным трем точкам A, B и B строится парабола, в виду чего предварительную кривую в этих местах надо намечать особенно тщательно, в полном соответствии с расположением центров тяжести.

Затем через точки A, B и B проведем до пересечения с осью расходов вертикальные линии, которые на ней дадут два горизонтальных отрезка (первый и второй отрезки). Уменьшим оба отрезка во столько раз, сколько сантиметров заключается между первой и второй или между второй и третьей горизонтальными линиями (в данном случае в шесть раз), и отложим уменьшенные отрезки горизонтально от оси уровней: первый — посредине между первой и второй горизонтальными линиями, второй — посредине между второй и третьей. Через полученные точки $Ж$ и E проведем прямую $ГД$, которая даст величины нарастания абсцисс параболы для каждого сантиметра оси ординат.

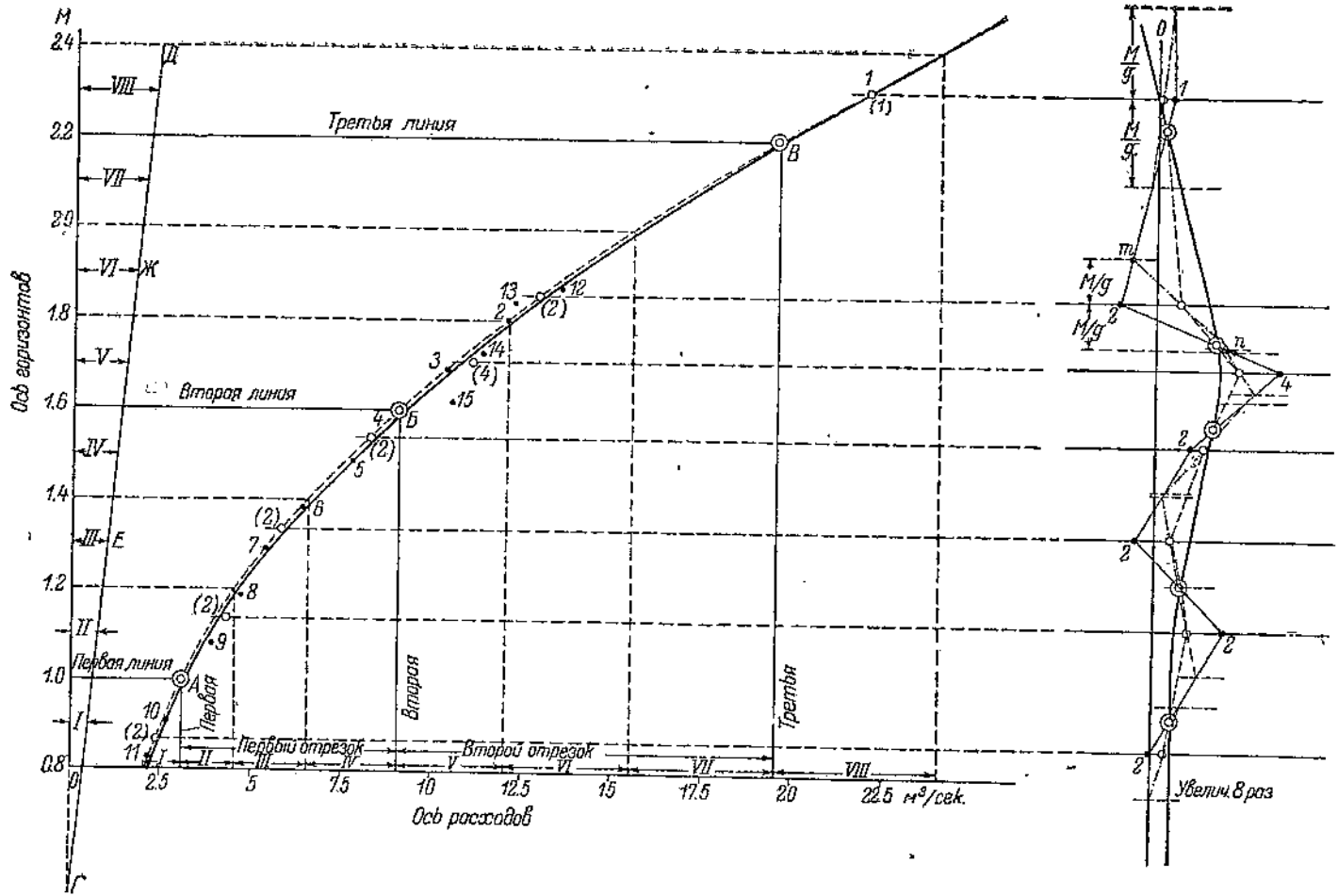


Рис. 284. Графическое построение параболы.

По этой прямой находим для середины каждого интервала отрезки *I, II* ..., *VIII*, которые удваиваем (так как длина интервала 2 *см*) и переносим на ось абсцисс в том же порядке: отрезки *II, III, IV* укладываются в первый отрезок, отрезки *V, VI, VII* — во второй; отрезок *I* располагается влево от первого отрезка, отрезок *VIII* — вправо от второго отрезка. Остается через границы интервалов провести горизонтальные линии до встречи с вертикальными линиями, проходящими через границы соответствующих отрезков *I, II*, ..., *VIII* на оси абсцисс (пунктир). Точки пересечения этих линий и дадут точки искомой параболы, которая на чертеже показана пунктиром.

Когда парабола проведена, нетрудно найти для каждой точки (центра тяжести) ее отклонение от параболы по горизонталям. Измеренные отклонения (в данном случае в сантиметрах) вписаны в последний столбец таблицы на стр. 208; для точек, лежащих вправо от кривой, отклонения приняты за положительные, для точек, лежащих влево, — за отрицательные.

Если отклонения значительны или преобладают отклонения одного знака, то полученную параболу нужно исправить при помощи *кривой поправок* (правая часть на рис. 234). Для этого правее кривой расходов проводим вертикальную линию *OO*, которую пересекаем горизонтальными линиями, проведенными через все точки центров тяжести, и откладываем на них соответственные отклонения — положительные вправо, отрицательные влево от вертикальной линии, ставя около каждой точки число, выражающее ее вес. Предварительно все отклонения увеличиваем с таким расчетом, чтобы проведенная через полученные точки так называемая *основная зигзагообразная линия* давала углы с вертикальной осью *OO* приблизительно 45° и не свыше 65° (на рис. 234 отклонения увеличены в 8 раз).

Затем берем длину интервала (в данном случае 0,02 *м*) и умножаем ее на наименьший из весов всех точек (в нашем примере 1); пусть получим длину *M*. Тогда около каждой точки, например, в *VI* интервале, проводим две горизонтальных прямых, одну выше, другую ниже ее, каждую в расстоянии $\frac{M}{g}$ от точки (g — вес точки).

Эти прямые пересекают ветви основной зигзагообразной линии, выходящие из данной точки (или их продолжения) в точках *m* и *n*. Соединяя последние прямой, находим точку ее пересечения с горизонтальной линией, соответствующей центру тяжести (кружок). У крайних точек (в *I* и *VIII* интервалах) дополняем недостающие ветви зигзагообразной линии вертикальными линиями. Соединяя прямыми линиями последовательно все кружки, получаем *вспомогательную зигзагообразную линию* (прерывистую на чертеже).

Задачей всего построения является отыскание точек взаимного пересечения двух зигзагообразных линий, основной и вспомогательной. Эти точки (двойные кружки) называются *центрами выравнивания*, и через них проводим общую плавную кривую (сплошная жирная на чертеже), которая тоже может иметь извилистый вид. Ее желательно проводить или целиком между обеими зигзагообразными линиями, или все время вне их, со стороны прерывистой линии. Однако, если кривая получается очень извилистой, можно считаться лишь с центрами выравнивания, не обращая внимания на зигзагообразные линии.

Эта кривая и представляет искомую кривую поправок к ранее проведенной параболе. Беря с нее поправки для границ интервалов и уменьшая их в то число раз, в какое они были увеличены (в данном примере в 8 раз), откладываем их вправо или влево (согласно знаку) от параболы, после чего через полученные точки проводим по лекалу окончательно исправленную кривую расходов (на чертеже сплошная линия). Для построенной параболы и окончательно исправленной кривой можно найти аналитическое выражение, о чем речь будет в § 60.

Очень часто парабола дает настолько малые отклонения от центров тяжести, что можно считать ее за окончательную кривую, не прибегая к ее исправлению путем построения кривой поправок.

§ 59. Графические методы построения прямой линии расходов.

Связь между расходами и уровнями, выражаемая кривой линией, неудобна при экстраполяции в том отношении, что продолжение кривой за пределы точек измерений в известной мере произвольно и неопределенно. Если даже нами уловлен закон кривой (графически или в виде уравнения) для серии действительно измеренных расходов, то это не дает уверенности в том, что этот же закон будет спра-

ведлив для уровней (или расходов), с одной стороны, бо́льших, а с другой — меньших, чем наблюдавшиеся. В этом отношении было бы удобно иметь вместо кривой расходов прямую линию, так как экстраполяция последней совершенно определенна. На установлении такой прямолинейной связи между расходами и величинами, зависящими от уровней, или же на приведении этой связи к прямолинейной путем употребления логарифмических масштабов и основаны некоторые методы обработки данных измерений.

В США находит применение следующий приближенный метод *Стивенса*. Уравнение (140) можно переписать так:

$$Q = \omega C\sqrt{RI} = (C\sqrt{I})(\omega\sqrt{R}).$$

Если множитель $C\sqrt{I}$ мало изменяется и может быть принят за постоянную величину α, то расход пропорционален величине $(\omega\sqrt{R})$, и мы должны получить прямолинейную связь

$$Q = \alpha(\omega\sqrt{R})$$

между расходами Q и соответственными значениями $(\omega\sqrt{R})$.

Однако коэфициент C при постоянной шероховатости является функцией гидравлического радиуса R, а в некоторых случаях и уклона I (при пользовании полной формулой *Гангийе-Куттера*). R увеличивается с повышением горизонта, что в действительности приводит и к увеличению C. Наряду с этим часто можно наблюдать в общем некоторое увеличение уклона с повышением уровня, причем это обстоятельство в формуле *Гангийе-Куттера* (141) влечет уменьшение C. При относительно большом уклоне влияние последнего на C становится практически несущественным, другие же формулы для C (см. § 54), как известно, вовсе не учитывают влияния уклона.

При больших значениях R коэфициент C изменяется сравнительно слабо, но все же заметно; например, по формуле *Гангийе-Куттера* (при $n = 0{,}030$) имеет значения C:

при I в ‰	0,05	0,1	0,2	0,4	1,0	10,0
для $R = 5{,}0$ м	51	47	45	44	43	43
для $R = 10{,}0$ м	58	53	50	48	47	46

Таким образом можно говорить только о приближенной прямолинейной связи между Q и $\omega\sqrt{R}$ и лишь при значительных глубинах (гидравлических радиусах), так как при малых R величина C меняется гораздо сильнее. В соответствии с этим экстраполяция становится возможной лишь в сторону больших расходов и тоже не может гарантировать большой точности. Для мелких потоков этот способ неприменим, но и для глубоких не всегда дает удовлетворительные результаты.

Гидравлический радиус обычно заменяется мало отличающейся от него глубиной средней $\left(H' = \frac{\omega}{B}\right)$, а кривая $\omega\sqrt{H'} = \psi(H)$

строится на основании профиля живого сечения или по данным измерений отдельных расходов.

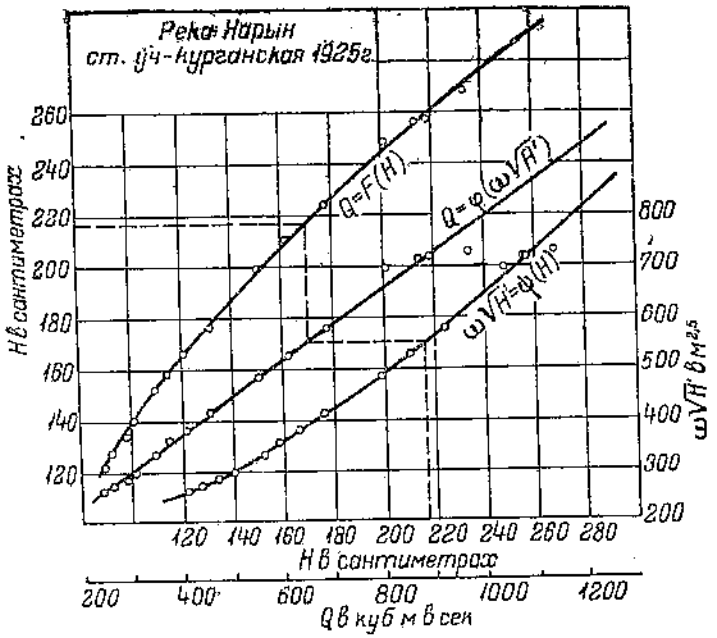


Рис. 235. Построение кривой расходов по методу Стивенса.

Например, для реки Нарын у ст. Уч-Курганской за 1925 г. имеем следующие данные:

№ по пор.	Время измерения	H см	Q м³/сек.	ω м²	B м	H' м	$\sqrt{H'}$	$\omega\sqrt{H'}$
1	22— VI	248	807	386	119,2	3,24	1,80	695
2	28— VI	256	867	401	125,3	3,19	1,79	718
3	29— VI	257	890	400	125,1	3,20	1,79	716
4	10— VII	268	969	406	126,7	3,20	1,79	727
5	13— VII	224	689	343	122,0	2,81	1,68	576
6	17— VII	210	610	322	121,0	2,66	1,63	525
7	21— VII	199	552	305	120,2	2,53	1,59	485
8	10—VIII	176	457	270	113,8	2,37	1,54	416
9	15—VIII	166	404	254	113,2	2,24	1,50	381
10	21—VIII	158	372	245	113,0	2,17	1,47	360
11	26—VIII	152	347	232	112,9	2,05	1,43	332
12	15— IX	140	305	215	112,0	1,92	1,38	297
13	18— IX	134	290	208	111,4	1,87	1,37	285
14	22— IX	127	261	202	111,6	1,82	1,35	273
15	28— IX	122	246	197	111,1	1,77	1,33	262

(Последние два столбца вычислены дополнительно).

По этим данным (рис. 235) строим сначала кривую $\omega\sqrt{H'} = \psi(H)$, откладывая по оси абсцисс уровни H, а по оси ординат — величины $\omega\sqrt{H'}$. Затем намечаем по оси абсцисс расходы и накладываем точки по координатам Q и $\omega\sqrt{H'}$, проводя через них среднюю прямую линию $Q = \varphi(\sqrt{H'})$. После этого нетрудно построить и кривую обычного вида $Q = F(H)$, переходя от уровней к расходам, как показано на рисунке пунктиром. Как видно, в данном случае прямая $Q = \alpha(\omega \sqrt{H'})$ выражена довольно ясно.

Великановым в метод *Стивенса* вводится некоторое уточнение: величина $\omega\sqrt{H'}$, равная $BH'^{3/2}$, заменяется $\int_0^B H^{3/2}\,db$, для чего строятся фиктивные поперечные профили той же ширины, но с глубинами $H^{3/2}$, и затем планиметруются.

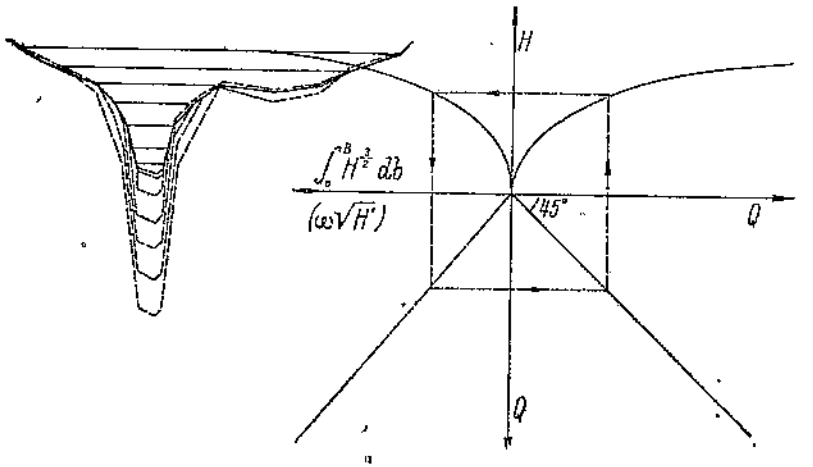


Рис. 236. Построение кривой расходов по методу Стивенса-Великанова.

Графическое оформление производится по схеме, изображенной на рис. 236. В левом верхнем квадранте вычерчивается поперечный профиль, на котором наносится ряд горизонтов, приуроченных к изломам профиля. Фиктивные профили для разных горизонтов (пунктир) вычерчиваются тут же. Затем в том же квадранте строится кривая $\omega\sqrt{H'} = \psi(H)$ и в нижнем левом квадранте — прямая $Q = \varphi(\omega\sqrt{H'})$. В правом нижнем квадранте проводится из начала координат прямая под углом 45° для переноса значений Q с вертикальной оси на горизонтальную, а в верхнем квадранте получается искомая кривая расходов. Таким образом обход квадрантов делается против часовой стрелки.

По той же схеме может производиться построение и для основного метода *Стивенса* (без фиктивных профилей). На практике линия $Q = \varphi(\omega\sqrt{H'})$ в большинстве случаев (для русла с поймой) получается не прямая, а кривая, почему, во избежание искажения кривой расходов, ее нужно проводить по всем имеющимся точкам, не добиваясь обязательного спрямления.

Эти же методы применяются при небольшом числе измеренных расходов (5—10) и наличии поперечного профиля русла. Если число измерений еще меньше (всего 3—5), то можно применить способ *«нормальных» кривых*, опирающийся также на близкую к прямой линии связь между «нормальными» и действительными расходами.

Кривые «нормальных» расходов строятся теоретически [по формуле (140)] для заданного поперечного профиля и определенных значений продольного уклона, шероховатости и ширины (имеются таблицы для прямоугольного, треугольного и параболического профилей при уклоне 0,0001, шероховатости по *Базену* 1,30 и ширине 100 *м*). По средним глубинам реки, отвечающим действительно измеренным расходам $Q_д$, отыскиваются нормальные расходы Q_0 (для данной формы русла) и отношения $\frac{Q_д}{Q_0} = z$. Затем строится зависимость z от соответствующих измерениям уровней H, позволяющая от нормальной кривой расходов перейти к действительной. Кривая $z = f(H)$ обычно близка к прямой, и способ дает практически удовлетворительные результаты, если известна форма русла, а измерения расходов надежны и охватывают значительную амплитуду уровней.[1]

Обращение криволинейной зависимости в прямолинейную путем применения *логарифмических масштабов* уже было освещено в § 19. Уравнение прямой линии, связывающее логарифмы Q и H, вообще имеет вид:

$$\lg Q = \lg a + n \lg H, \tag{161}$$

где $\lg a$ — отрезок, отсекаемый прямой на оси $\lg Q$, а n есть тангенс угла, образуемого прямой с осью $\lg H$.

Потенцируя это уравнение, получим:

$$Q = aH^n, \tag{162}$$

откуда следует, что *только такого рода* криволинейная зависимость может быть превращена в прямолинейную при помощи логарифмической анаморфозы.

Уравнение (162) есть уравнение параболы n-ой степени с параметрами (постоянными коэфициентами) a и n; величине $Q = 0$ должно соответствовать значение $H = 0$. При произвольно установленном нуле рейки это условие, вообще говоря, не выполнено. Чтобы получить прямую линию в логарифмических масштабах, необходимо привести в соответствие расходы с показаниями уровня, иначе говоря, назначить нуль графика уровней на такой высоте, которой отвечает нулевой расход.

Если последнему по рейке отвечает отсчет b (положительный или отрицательный), то, очевидно, уравнение (162) надо переписать в таком виде:

$$Q = a(H + b)^n, \tag{163}$$

где H будет представлять действительные отсчеты по рейке (высоты

[1] Предложенный в 1931 г. *Первышевым* способ построения прямой линии $\sqrt[3]{Q} = f(\sqrt{\omega})$ теоретически не обоснован и не оправдывается опытным материалом.

уровня над нулем наблюдений или отметки горизонта воды), а b — величину, аналогичную приводке (§ 14).

Несоблюдение этого условия приводит к тому, что логарифмы Q и H вообще не дают на графике прямой линии.

Аналитический способ определения величины b изложен ниже, в § 60. Если эта поправка известна, то графическое построение *«прямой расходов»* не представляет затруднений. Последнюю можно строить или на обыкновенной клетчатке (миллиметровке), откладывая $\lg Q$ и $\lg (H - b)$ в некоторых масштабах (ср. с логарифмической анаморфозой, рис. 49, § 19), или на специальной логарифмической бумаге, не вычисляя логарифмов.

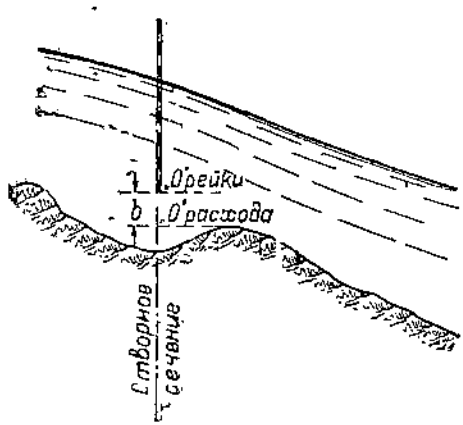


Рис. 237. Нуль расхода и нуль рейки.

Величину b можно определить как высоту наинизшей точки дна по отношению к нулю рейки, но иногда нулевой расход соответствует не этой точке дна, а определённой глубине воды, обусловливаемой поднятием дна или препятствиями ниже по течению, и тогда о величине b можно судить по продольному профилю русла (рис. 237).

В качестве примера на рис. 238 на логарифмической бумаге наложены точки измерений, приведенных в таблице на стр. 208. Величина b для этого случая равна $+0{,}48$ *м*.

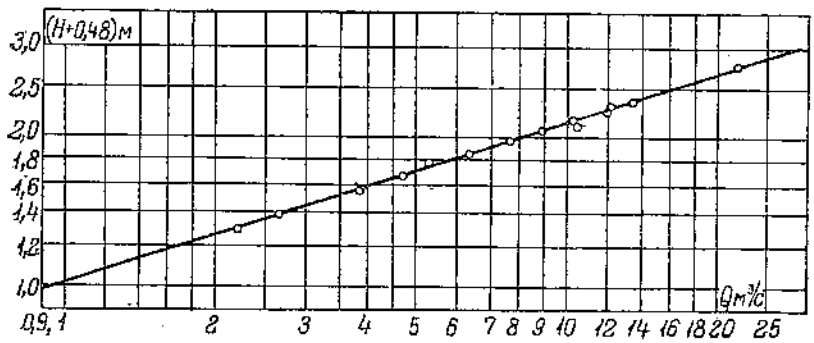


Рис. 238. Кривая расходов в логарифмических координатах.

Надо иметь в виду, что на логарифмической клетчатке мы не имеем значений, равных нулю, так как $\lg 0 = -\infty$. Вертикальным и горизонтальным линиям отвечают числа, величины логарифмов которых отложены в некотором масштабе.

Так как $\lg 1 = 0$, $\lg 10 = 1$, $\lg 100 = 2$ и т. д., $\lg 0{,}1 = -1$, $\lg 0{,}01 = -2$ и т. д., и вообще $\lg 10^n = n$ единиц, где n — любое целое (положительное или отрицательное) число, то расстояния между числами,

равными 10^n и 10^{n+1}, на клетчатке одинаковы, представляя ее *базис* (например, 10 *см*), а начало координат находится на пересечении линий, отвечающих значениям чисел, равных единице (1 *м* и 1 *м³/сек.*), так как $\lg 1 = 0$.

Как видно из изложенного, этот способ построения кривой расходов имеет очевидные преимущества перед предыдущим ($Q = a\omega\sqrt{H'}$) как в смысле точности, так и потому, что он допускает экстраполяцию в обе стороны. Он широко применяется, большей частью наряду с определением вида кривой (163), т. е. параметров a и n, графоаналитическим методом.

§ 60. Установление кривой расходов графоаналитическими методами. Чаще всего для кривой расходов применяются уравнения вида:

$$Q = a + bH + cH^2 \qquad (164)$$

или (163):

$$Q = a(H + b)^n.$$

Первое уравнение представляет параболу 2-ой степени, с графическим построением которой мы уже познакомились в § 58.

Теперь покажем, как определить входящие в это уравнение постоянные коэфициенты a, b и c.

Обозначим величину интервалов, на которые разбита ось уровней H, через ΔH (на рис. 234 $\Delta H = 0{,}20$ *м*), а высоту уровня, соответствующую нижней границе первого интервала, через H_0. Тогда верхней границе любого n-го интервала отвечает уровень $H_0 + n\,\Delta H$, а нижней $H_0 + (n-1)\,\Delta H$.

Соответствующие этим уровням расходы, согласно зависимости (164), выразятся следующим образом:

$$Q_n = a + b\,(H_0 + n\Delta H) + c(H_0 + n\Delta H)^2,$$

$$Q_{n-1} = a + b\,[H_0 + (n-1)\,\Delta H] + c[H_0 + (n-1)\,\Delta H]^2$$

и разность между ними равна:

$$Q_n - Q_{n-1} = b\Delta H + c\,\{[H_0 + n\Delta H]^2 - [H_0 + (n-1)\,\Delta H]^2\}.$$

Заменяя разность квадратов в фигурных скобках произведением суммы на разность, получим:

$$Q_n - Q_{n-1} = b\Delta H + c\,[2H_0 + (2n-1)\,\Delta H]\,\Delta H,$$

или

$$Q_n - Q_{n-1} = \left[b + 2c\left(H_0 + n\Delta H - \frac{\Delta H}{2}\right)\right]\Delta H.$$

Здесь в простых скобках стоит уровень, отвечающий середине n-го интервала:

$$H_n = H_0 + n\Delta H - \frac{\Delta H}{2},$$

в квадратных же скобках стоит величина, связанная с ним линейной зависимостью, т. е. уравнением прямой линии, и равная:

$$b + 2cH_n = \frac{Q_n - Q_{n-1}}{\Delta H}.$$

Таким образом разность расходов, соответствующих границам интервала, отнесенная к единице длины интервала, выражается абсциссами точек прямой линии с угловым коэфициентом $2c$ и ординатами точек, равными средним горизонтам H_n.

Построить эту прямую можно по двум точкам, для чего нужно знать разницу между двумя парами расходов и соответствующие интервалы, или величины трех расходов и соответствующих уровней. Сообразно с этим нами и были на-

мечены на рис. 234 три точки A, $Б$ и $В$, для упрощения на равных расстояниях по высоте. Деля разницы между расходами (первый и второй отрезки) на соответствующие интервалы (тройные на рис. 234) и откладывая их посередине интервалов (на уровнях H_n), мы и получили точки $Ж$ и $Е$ искомой прямой линии.

Если масштаб расходов есть a_1 (в 1 *см* $a_1 = 1{,}25$ *м*³/*сек.*), а горизонтов b_1 (в 1 *см* $b_1 = 0{,}1$ *м*), то масштаб абсцисс прямой линии $c_1 = \frac{a_1}{b_1}$ $\left(\frac{1{,}25}{0{,}1} = 12{,}5 \text{ единиц}\right)$.

Абсцисса точки $Ж$:

$$x_1 = b + 2cH_1,$$

точки $Е$:

$$x_2 = b + 2cH_2$$

(берем абсциссы с чертежа и умножаем их на $c_1 = 12{,}5$: $x_1 = 1{,}4$ (*см*) $\times$ 12,5 = = 17,5 единиц, $x_2 = 0{,}8$ (*см*) $\times$ 12,5 = 20,0 единиц, $H_1 = 1{,}90$ *м*, $H_2 = 1{,}30$ *м*).

Вычитая из первого выражения второе, находим c:

$$c = \frac{x_1 - x_2}{2(H_1 - H_2)} \tag{165}$$

(для нашего примера получаем $c = 6{,}25$), после чего нетрудно определить и b:

$$b = x_1 - 2cH_1 = x_2 - 2cH_2 \tag{166}$$

($b = -6{,}25$).

Наконец, из уравнения (164), зная b и c, находим a по координатам одной из точек A, $Б$ или $В$:

$$a = Q_B - (bH_B + cH_B^2) \tag{167}$$

($a = 3{,}05$).

В нашем случае (рис. 234) уравнение параболы есть:

$$Q = 3{,}05 - 6{,}25\,H + 6{,}25\,H^2.$$

Тем же методом можно подобрать коэфициенты параболы для окончательной кривой, исправленной поправками. Проще это можно сделать, если кривая поправок (рис. 234) представляет прямую линию:

$$\Delta Q = d + eH. \tag{168}$$

Тогда уравнение исправленной кривой найдется путем сложения формул (164) и (168):

$$Q + \Delta Q = (a + d) + (b + e)\,H + cH^2.$$

Особенно просто исправление, если поправка постоянна: $\Delta Q = d$ (прямая поправок параллельна своей оси); тогда

$$Q + \Delta Q = (a + d) + bH + cH^2.$$

Коэфициенты параболы a, b и c могут быть определены и другим путем: наметив три точки, через которые должна пройти кривая, и зная их координаты, можно составить три уравнения типа (164), из которых и найти искомые коэфициенты. Затем парабола строится по точкам — по значениям абсцисс Q, вычисленным для заданных ординат H.

Определение коэфициентов уравнения (163):

$$Q = a(H + b)^n$$

удобнее всего делать помощью построения логарифмической анаморфозы. Предварительно, как уже указывалось, нужно подобрать величину b для того, чтобы точки на анаморфозе действительно ложились на прямую линию. Эта задача сводится к отысканию точки касания кривой расходов, с осью ординат H ($O = 0$) и, следовательно, будет иметь точное решение, если мы поставим условия, определяющие значения всех трех параметров уравнения (163): a, b и n. Для этого необходимо и достаточно установить три точки, через которые должна пройти кривая.

Поэтому сначала по данным парам значений Q и H строится на обыкновенной клетчатке на-глаз приближенная кривая, которая проводится особенно тщательно близ начала и конца. Здесь выбирается по одной точке с координатами Q_1 и H_1 в нижней части и Q_3 и H_3 в верхней. Координату Q_2 третьей точки в средней части кривой для удобства назначаем равной

$$Q_2 = \sqrt{Q_1 \cdot Q_3} \tag{169}$$

и по ней находим ординату H_2, следя за тем, чтобы и в этом месте предварительная кривая располагалась в полном соответствии с точками измерений.

Тогда, подставляя в (169) выражения для расходов согласно (163), получим:

$$a(H_2+b)^n = \sqrt{a(H_1+b)^n a(H_3+b)^n}$$

или

$$(H_2+b)^2 = (H_1+b)(H_3+b).$$

Отсюда

$$b(H_1+H_3-2H_2) = H_2^2 - H_1H_3$$

и

$$b = \frac{H_2^2 - H_1H_3}{H_1+H_3-2H_2}. \tag{170}$$

Для данных рис. 234, где точки хорошо ложатся на кривую, можно принять для Q_1 самый малый расход (2,23 *м³/сек.*), для Q_3 — самый большой (22,01 *м³/сек.*). Соответствующие уровни равны:

$$H_1 = 0{,}83\ м \text{ и } H_3 = 2{,}31\ м.$$

Тогда, согласно (169), $Q_2 = 7{,}01$ *м/сек.* За H_2 можно принять ординату точки пересечения вертикальной линии, соответствующей Q_2, с прямой, соединяющей точки расходов № 5 и № 6: $H_2 = 1{,}432$ *м*.

Подставляя эти данные в формулу (170), найдем $b = 0{,}480$ *м*. Принимая во внимание эту величину и данные таблицы на стр. 208, построена логарифмическая анаморфоза (рис. 238), где, как видно, точки дали хорошо выраженную прямую линию. Если горизонт нулевого расхода известен заранее, то логарифмическая анаморфоза может быть сразу построена.

Тангенс угла α, равный показателю n, может быть найден простым измерением катетов треугольника, например, по оси H от вершины угла α до $H = 3{,}0$ *м* и по этой горизонтали от оси H до прямой. Первый катет равен 47,5 *мм*, второй — 145,5 *мм*.

$$n = \operatorname{tg}\alpha = \frac{145{,}5}{47{,}5} = 3{,}05.$$

При $(H+b) = 1$, согласно (163): $Q = a = 0{,}96$ (отрезок на оси Q).

Необходимо заметить, что величина b, определяемая по формуле (170), чрезвычайно чувствительна к малейшему сдвигу уровней H_1, H_2, H_3, почему весьма полезно предварительно установить ее порядок, намечая на обычной бумаге на-глаз плавную кривую расходов и продолжая ее вниз до нулевого расхода. Таким образом выясняется физическое значение и знак b, как сдвига по вертикали нуля расхода по отношению к нулю рейки.

Установление уровня H_2 по заданному расходу Q_2 также допускает некоторый произвол и возможность получения нескольких групп взаимносвязанных значений b, n и a. Условием выпуклости кривой расходов определяется верхнее предельно-возможное положе-

ние нуля расхода (если кривая расходов в обыкновенных масштабах — прямая, то $H_2 = \sqrt{H_1 H_3}$). Нижнее положение отодвигается в бесконечность, если $H_2 = \frac{H_1 + H_3}{2}$ (знаменатель в формуле (170) обращается в нуль).

При очень больших b также и n становится чрезвычайно большим (а a — соответственно малым), на логарифмической клетчатке прямая делается очень пологой и трудно отличима от кривой, почему больших b следует избегать.

Если крайние основные точки Q_1 и Q_3 недостаточно надежны, то необходимо проверить величину b по другим ближайшим точкам. Может оказаться также, что вся совокупность точек не укладывается в одну кривую и надо разбить ее на 2—3 самостоятельных кривых.

Можно также взять две точки на полученной прямой и, подставив их координаты в уравнение (161), найти a и n из двух уравнений.

Наконец можно и не строить логарифмической анаморфозы. Имеем:

$$Q_1 = a(H_1 + b)^n,$$
$$Q_3 = a(H_3 + b)^n.$$

Отсюда

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \left(\frac{H_1 + b}{H_3 + b}\right)^n,$$

или

$$\lg\left(\frac{Q_1}{Q_3}\right) = n \lg\left(\frac{H_1 + b}{H_3 + b}\right)$$

и

$$n = \frac{\lg \frac{Q_1}{Q_3}}{\lg\left(\frac{H_1 + b}{H_3 + b}\right)}. \qquad (171)$$

После этого нетрудно найти и a:

$$a = \frac{Q_1}{(H_1 + b)^n} = \frac{Q_3}{(H_3 + b)^n}. \qquad (172)$$

Для разобранного примера уравнение кривой расходов имеет вид:

$$Q = 0{,}96\,(H + 0{,}48)^{3{,}05}.$$

Можно округлить показатель, например, до 3,00, тогда несколько изменятся величины b и a. Новые их значения найдем, подставив в уравнение $Q = a_1(H + b_1)^3$ координаты двух точек (например, Q_1, H_1 и Q_3, H_3) и решив совместно два уравнения с неизвестными a_1 и b_1.

Уравнение (163) можно представить и в таком виде:

$$\sqrt[n]{Q} = \sqrt[n]{a}\,(H + b) = A + BH, \qquad (173)$$

где $A = b\sqrt[n]{a}$ и $B = \sqrt[n]{a}$. Это уравнение прямой линии, связывающее $\sqrt[n]{Q}$ и H. Если знать показатель n, то точки должны дать прямую линию на простой клетчатке, причем для построения этой прямой не нужно знать заранее величину b, а она, так же как и a, может быть найдена по коэфициентам A и B прямой (173).

Для прямоугольного широкого русла шириной B и глубиной H можно приближенно написать:

$$Q = (BH)\,C\sqrt{HI} = aH^{3/2}$$

или вообще:

$$Q = a\,(H + b)^{1{,}5}.$$

Таким же образом найдем для русла параболического профиля:

$$Q = a(H+b)^2$$

и для треугольного:

$$Q = a(H+b)^{2,5}.$$

Отсюда видно, что величина показателя n должна быть близка к значениям 1,5—2,5.

Для естественных потоков, как мы только что видели, она может несколько выходить за эти пределы. Можно задаться средним значением показателя, например, $n = 2$, и наложить на чертеж точки по значениям H и $\sqrt{Q}$. Но можно также более точно найти n по анаморфозе или из формулы (171) и потом округлить. Для этого потребуется предварительно определить b по формуле (170).

На рис. 239 наложены точки по данным H и $\sqrt{Q}$ таблицы на стр. 212, дающие хорошо выраженную прямую линию.

Беря координаты двух точек прямой, например, $H_1 = 120$, $\sqrt{Q_1} = 15{,}4$ и $H_2 = 260$, $\sqrt{Q_2} = 30{,}0$, получаем:

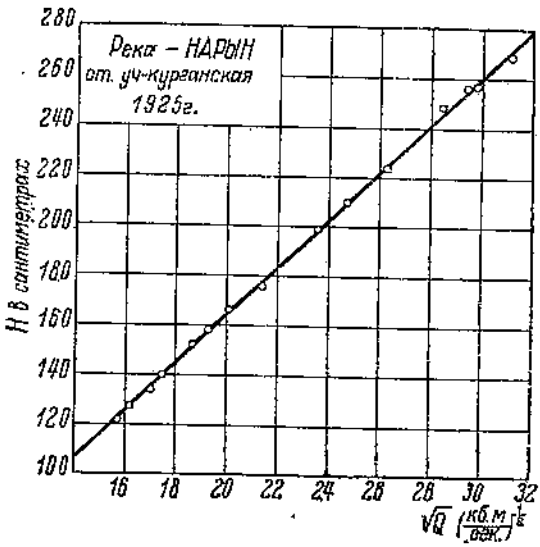


Рис. 239. Кривая расходов $\sqrt[n]{Q} = f(H)$.

$$15{,}4 = A + B \cdot 120,$$
$$30{,}0 = A + B \cdot 260.$$

Отсюда

$$B = 0{,}104, \quad A = 2{,}90$$

и уравнение прямой (173):

$$\sqrt{Q} = 2{,}90 + 0{,}104\,H.$$

При этом $0{,}104 = \sqrt{a}$ и $2{,}90 = b \cdot 0{,}104$, откуда: $a = 0{,}0109$; $b = 27{,}8$, и уравнение кривой расходов:

$$Q = 0{,}0109(H + 27{,}8)^2.$$

Если проведение прямой затруднительно вследствие разбросанности точек, то коэфициенты A и B могут быть найдены более точно по способу наименьших квадратов, применение которого для определения коэфициентов тарировочной кривой аналогичного вида ($v = v_0 + kn$) было рассмотрено в § 34. Этот метод является, собственно говоря, уже чисто аналитическим.

Для случая, когда $b = 0$ (нуль поста совпадает с горизонтом нулевого расхода), уравнение (163) обращается в (162):

$$Q = aH^n.$$

§ 61. Аналитические методы установления кривой расходов. В предыдущих способах мы пользовались точками измерений, наложенными на чертеж, проводя кривую или на-глаз или устанавливая те точки, через которые должна пройти определенного вида кривая. При этом был неизбежен некоторый произвол, практически не играющий большой роли, так как для проведения кривой мы или глазомерно выбирали наилучшую кривую, или опирались не на все точки измерений, а лишь на отдельные группы их. В связи с этим каждое решение допускало вариации в некоторых пределах.

Аналитические методы установления кривой расходов основываются на следующих положениях:

1) Задается общий вид кривой, обычно параболы n-го порядка:

$$Q = a + bH + cH^2 + dH^3 + \ldots + mH^n, \qquad (174)$$

причем чаще всего принимается парабола 2-го порядка (164).

2) Постоянные коэфициенты (параметры) параболы $a, b, c \ldots$ определяются по способу наименьших квадратов, т. е. из условия, чтобы сумма квадратов отклонений всех точек от кривой была наименьшей. Для параболы 2-го порядка эта сумма равна:

$$S = \sum_1^n (a + bH_i + cH_i^2 - Q_i)^2,$$

где n — число точек или измеренных расходов, и дает минимум при условиях:

1) $$\frac{\partial S}{\partial a} = 0;$$

2) $$\frac{\partial S}{\partial b} = 0;$$

3) $$\frac{\partial S}{\partial c} = 0.$$

Иначе говоря:

1) $$na + b\sum H + c\sum H^2 - \sum Q = 0; \qquad (175)$$

2) $$a\sum H + b\sum H^2 + c\sum H^3 - \sum QH = 0; \qquad (176)$$

3) $$a\sum H^2 + b\sum H^3 + c\sum H^4 - \sum QH^2 = 0. \qquad (177)$$

Это — три так называемых *нормальных уравнения* с тремя неизвестными a, b, c. Для их составления необходимо вычислить 7 сумм: ΣH, ΣH^2, ΣH^3, ΣH^4, ΣQ, ΣQH и ΣQH^2, причем число слагаемых в каждой сумме равно числу измеренных расходов.

Оценка полученной кривой производится на основании вычисления *среднего квадратичного отклонения*, т. е. величины

$$\mu = \sqrt{\frac{S}{n}},$$

где S по-предыдущему есть сумма квадратов отклонений точек измерений от кривой:

$$S = \sum_1^n \lambda_i^2,$$

а

$$\lambda_i = (a + bH_i + cH_i^2) - Q_i.$$

Гениальным русским математиком, академиком *Чебышевым* в 1859 г. разработано применение метода наименьших квадратов путем *последовательного приближения* составляемого уравнения к данным наблюдений. Способ *Чебышева* позволяет находить вид уравне-

ния (174), соблюдая условие минимума суммы квадратов отклонений, постепенными приближениями:

$$\begin{aligned} Q &= a && \text{(1-е приближение)},\\ Q &= a_1 + b_1 H && (2\ \text{»}\quad\ \text{»}),\\ Q &= a_2 + b_2 H + c_2 H^2 && (3\ \text{»}\quad\ \text{»}),\\ Q &= a_3 + b_3 H + c_3 H^2 + d_3 H^3 && (4\ \text{»}\quad\ \text{»}), \end{aligned}$$

и т. д.

Каждое приближение оценивается величиной среднего квадратичного отклонения μ, и от него можно перейти к следующему приближению, со следующей высшей степенью переменной H, использовав все вычисления, сделанные для предыдущих приближений.

В вышеописанной, классической форме применения способа наименьших квадратов, если бы парабола 2-й степени оказалась неудовлетворительной, пришлось бы нормальные уравнения заменить новыми (четырьмя) и решать их сначала для получения коэфициентов параболы 3-й степени и т. д.

Например, для реки Волги у Вязовской гидрометрической станции в свое время наиболее подходящими оказались параболы 5-й степени: при прибыли воды

$$Q = -126 + 228{,}52H - 106{,}29H^2 + 70{,}44H^3 - 13{,}76H^4 + 1{,}08H^5,$$

при убыли воды

$$Q = -120 + 23{,}66H + 55{,}84H^2 - 27{,}92H^3 + 9{,}17H^4 - 0{,}75H^5$$

(Q в куб. саж. в сек., H в саж. над нулем поста).

Не приводя теоретического обоснования метода *Чебышева* вследствие его сложности, остановимся лишь на выяснении порядка вычислений и применения его к установлению уравнения кривой расходов.

Уравнение (174) представим в таком виде:

$$Q = A_0\varphi_0(H) + A_1\varphi_1(H) + A_2\varphi_2(H) + \ldots + A_m\varphi_m(H). \qquad (178)$$

Здесь $A_0, A_1, A_2, \ldots, A_m$ — коэфициенты, $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_m$ — функции переменной H, причем каждая из них имеет вид:

$$\varphi_i = \alpha_0 + \alpha_1 H + \alpha_2 H^2 + \ldots + \alpha_{i-1}H^{i-1} + H^i,$$

т. е. значок при φ соответствует наивысшей степени переменной H, коэфициент α при которой равен единице.

Эти функции составляются таким образом:

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= 1;\\ \varphi_1 &= (H - q_1)\varphi_0;\\ \varphi_2 &= (H - q_2)\varphi_1 - p_2\varphi_0;\\ \varphi_3 &= (H - q_3)\varphi_2 - p_3\varphi_1; \end{aligned}$$

и т. д. вообще

$$\varphi_m = (H - q_m)\varphi_{m-1} - p_m\varphi_{m-2}, \qquad (179)$$

где

$$q_1 = \frac{(0,1)}{(0,0)};$$

$$q_2 = \frac{(1,2)}{(1,1)} - \frac{(0,1)}{(0,0)} \quad \text{и} \quad p_2 = \frac{(1,1)}{(0,0)};$$

$$q_3 = \frac{(2,3)}{(2,2)} - \frac{(1,2)}{(1,1)} \quad \text{и} \quad p_3 = \frac{(2,2)}{(1,1)},$$

и т. д. и вообще

$$q_m = \frac{(m-1,\ m)}{(m-1,\ m-1)} - \frac{(m-2,\ m-1)}{(m-2,\ m-2)};$$

$$p_m = \frac{(m-1,\ m-1)}{(m-2,\ m-2)}.$$

В эти выражения входят *символы Чебышева*

$$(h,\ k) = \sum_1^n \varphi_n(H_i) H_i^k,$$

отличные от нуля лишь при $k \geqslant h$ и вычисляемые следующим образом (будем вместо знака Σ употреблять квадратные скобки [ ]):

а) символы нулевого порядка:

$$(0,0) = [H^0] = n \text{ (числу наблюдений или измерений)},$$
$$(0,1) = [H],$$
$$(0,2) = [H^2],$$
$$(0,3) = [H^3] \text{ и т. д.}$$

в) символы второго порядка:

$$(1,1) = (0,2) - q_1(0,1),$$
$$(1,2) = (0,3) - q_1(0,2),$$
$$(1,3) = (0,4) - q_1(0,3),$$
$$(1,4) = (0,5) - q_1(0,4) \text{ и т. д.}$$

б) символы первого порядка:

$$(2,2) = (1,3) - q_2(1,2) - p_2(0,2),$$
$$(2,3) = (1,4) - q_2(1,3) - p_2(0,3),$$
$$(2,4) = (1,5) - q_2(1,4) - p_2(0,4) \text{ и т. д.}$$

г) символы третьего порядка:

$$(3,3) = (2,4) - q_3(2,3) - p_3(1,3),$$
$$(3,4) = (2,5) - q_3(2,4) - p_3(1,4),$$
$$(3,5) = (2,6) - q_3(2,5) - p_3(1,5) \text{ и т. д.}$$

и вообще h-го порядка:

$$(h,h) = (h-1,\ h+1) - q_h(h-1,\ h) - p_h(h-2,\ h);$$
$$(h,\ h+1) = (h-1,\ h+2) - q_h(h-1,\ h+1) - p_h(h-2,\ h+1);$$
$$(h,\ h+2) = (h-1,\ h+3) - q_h(h-1,\ h+2) - p_h(h-2,\ h+2) \text{ и т. д.}$$

Коэфициенты A находятся по формулам:

$$A_0 = \frac{[Q]}{(0,0)},$$

$$A_1 = \frac{[HQ] - (0.1)\,A_0}{(1,1)},$$

$$A_2 = \frac{[H^2Q] - (0,2)\,A_0 - (1.2)\,A_1}{(2,2)},$$

$$A_3 = \frac{[H^3Q] - (0,3)\,A_0 - (1,3)\,A_1 - (2,3)\,A_2}{(3,3)}$$

и т. д. вообще

$$A_m = \frac{[H^mQ] - (0,\ m)\,A_0 - (1,\ m)\,A_1 - \ldots - (m-1,\ m)\,A_{m-1}}{(m,\ m)}. \qquad (180$$

Наконец, для сумм квадратов отклонений $[\lambda\lambda]$ служат формулы:

$$[\lambda\lambda]_0 = [Q^2] - (0,0)\, A_0^2,$$
$$[\lambda\lambda]_1 = [\lambda\lambda]_0 - (1,1)\, A_1^2,$$
$$[\lambda\lambda]_2 = [\lambda\lambda]_1 - (2,2)\, A_2^2,$$
$$[\lambda\lambda]_3 = [\lambda\lambda]_2 - (3,3)\, A_3^2$$

и т. д. вообще

$$[\lambda\lambda]_m = [\lambda\lambda]_{m-1} - (m,m)\, A_m^2$$

Вычисляя последовательно члены уравнения (178) и производя приведение подобных членов, мы и будем получать ряд приближений с заданным количеством членов уравнения (174).

Основными данными для этих приближений, как видно из приведенных формул, будут служить:

а) символы нулевого порядка, т. е. суммы $[H]$, $[H^2]$, $[H^3]$, $[H^4]$ ...

б) так называемые *моменты ординат* или суммы $[Q]$, $[HQ]$, $[H^2Q]$, $[H^3Q]$ ..., необходимые для вычисления коэфициентов A.

При этом потребуется вычислить:

1) для первого приближения [первый член уравнения (178)]

$$[Q],$$

2) для второго приближения [первый и второй члены уравнения (178)] дополнительно:

$$[H], \quad [H^2], \quad [HQ];$$

3) для третьего приближения [первый, второй и третий члены уравнения (178)] сверх того:

$$[H^3], \quad [H^4], \quad [H^2Q],$$

4) для четвертого приближения [четыре первых члена уравнения (178)] еще:

$$[H^5], \quad [H^6], \quad [H^3Q]$$

и т. д.

На основании этих исходных величин могут быть вычислены символы *Чебышева* высших порядков, а по ним, функции φ и коэфициенты A.

Кроме того, для вычисления сумм квадратов отклонений $[\lambda\lambda]$ понадобится один раз подсчитать сумму $[Q^2]$.

Первое приближение (нулевая степень H) даст нам для Q постоянное значение $Q = A_0$ (среднее арифметическое из наблюденных расходов). Второе приближение даст уравнение прямой линии, третье — параболу 2-й степени, четвертое — параболу 3-й степени и т. д.

Приведем пример вычисления последовательных приближений уравнения кривой расходов по способу *Чебышева*, пользуясь вышеприведенными данными для р. Нарын у ст. Уч-Курганской (стр. 212). С этой целью составим таблицу основных величин, необходимых для вычисления четырех приближений (см. таблицу на стр. 226; в ней уровни H выражены в метрах).

1-е приближение.

$$\varphi_0 = 1; \quad A_0 = \frac{[Q]}{(0,0)} = \frac{[Q]}{n} = \frac{8066}{15} = 537{,}7333.$$

Следовательно: $A_0\varphi_0(H) = 537{,}7333$,

и в первом приближении:

$$Q = 537{,}73;$$

$$[\lambda\lambda]_0 = [Q^2] - (0,0)\, A_0^2 = 5\,222\,144 - 15 \cdot 537{,}7333^2 = 884\,787;$$

Среднее отклонение:

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{[\lambda\lambda]_0}{n}} = \sqrt{\frac{884\,787}{15}} = 242{,}9.$$

2-е приближение.

$$(0,1) = [H] = 28{,}37; \quad (0,2) = [H^2] = 57{,}3959;$$

$$q_1 = \frac{(0,1)}{(0,0)} = \frac{28{,}37}{15} = 1{,}89133;$$

$$(1,1) = (0,2) - q_1 (0,1) = 57{,}3959 - 1{,}89133 \cdot 28{,}37 = 3{,}7388;$$

$$\varphi_1 = H - q_1 = H - 1{,}89133;$$

$$A_1 = \frac{[HQ] - (0,1) A_0}{(1,1)} = \frac{17065{,}29 - 28{,}37 \cdot 537{,}7333}{3{,}7388} = 484{,}059.$$

Следовательно:

$$A_1 \varphi_1 (H) = 484{,}059 (H - 1{,}89133) = 484{,}059 H - 915{,}517,$$

и во втором приближении:

$$Q = A_0 \varphi_0 (H) + A_1 \varphi_1 (H) = 537{,}733 + 484{,}059 H - 915{,}517,$$

или

$$Q = -377{,}784 + 484{,}059 H.$$

$$[\lambda\lambda]_1 = [\lambda\lambda]_0 - (1,1) A_1^2 = 884\,787 - 3{,}7388 \cdot 484{,}059^2 = 8\,737;$$

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{[\lambda\lambda]_1}{n}} = \sqrt{\frac{8\,737}{15}} = 24{,}1.$$

3-е приближение.

$$(0,3) = [H^3] = 123{,}1311; \quad (0,4) = [H^4] = 276{,}9363;$$

$$(1,2) = (0,3) - q_1 (0,2) = 123{,}1311 - 1{,}89133 \cdot 57{,}3959 = 14{,}5763;$$

$$(1,3) = (0,4) - q_1 (0,3) = 276{,}9363 - 1{,}89133 \cdot 123{,}1311 = 44{,}0543;$$

$$p_2 = \frac{(1,1)}{(0,0)} = \frac{3{,}7388}{15} = 0{,}249253;$$

$$q_2 = \frac{(1,2)}{(1,1)} - \frac{(0,1)}{(0,0)} = \frac{14{,}5763}{3{,}7388} - \frac{28{,}37}{15} = 2{,}00733;$$

$$(2,2) = (1,3) - q_2 (1,2) - p_2 (0,2) =$$
$$= 44{,}0543 - 2{,}00733 \cdot 14{,}5763 - 0{,}249253 \cdot 57{,}3959 = 0{,}4888;$$

$$\varphi_2 = (H - q_2) \varphi_1 - p_2 \varphi_0 = (H - 2{,}00733) \cdot (H - 1{,}89133) -$$
$$- 0{,}249253 = H^2 - 3{,}89866 H + 3{,}54728;$$

$$A_2 = \frac{[H^2 Q] - (0,2) A_0 - (1,2) A_1}{(2,2)} =$$

$$= \frac{37\,981{,}53 - 57{,}3959 \cdot 537{,}7333 - 14{,}5763 \cdot 484{,}059}{0{,}4888} = 126{,}944.$$

Следовательно

$$A_2 \varphi_2 (H) = 126{,}944 (H^2 - 3{,}89866 H + 3{,}54728) = 126{,}944 H^2 -$$
$$- 494{,}910 H + 450{,}304,$$

и в третьем приближении:

$$Q = A_0 \varphi_0 (H) + A_1 \varphi_1 (H) + A_2 \varphi_2 (H) =$$
$$= -377{,}784 + 484{,}059 H + 126{,}944 H^2 - 494{,}910 H + 450{,}304$$

или

$$Q = 72{,}520 - 10{,}851 H + 126{,}944 H^2$$

$$[\lambda\lambda]_2 = [\lambda\lambda]_1 - (2,2) A_2^2 = 8\,737 - 0{,}4888 \cdot 126{,}944^2 = 860;$$

$$\mu_2 = \sqrt{\frac{[\lambda\lambda]_2}{n}} = \sqrt{\frac{860}{15}} = 7{,}57.$$

Таблица основных величин для подсчета кривой расходов по способу Чебышева

№ по пор.	Для 1-го приближения	Для 2-го приближения			Для 3-го приближения			Для 4-го приближения			Для вычисления $[\lambda\lambda]$
		H	HQ	$H^{2'}$	H^2Q	H^3	H^4	H^3Q	H^5	H^6	Q^2
1	807	2,48	2 001,36	6,1504	4 963,37	15,2530	37,8274	12 309,17	93,8121	232,6540	651 249
2	867	2,56	2 219,52	6,5536	5 681,97	16,7772	42,9497	14 545,83	109,9511	281,4745	751 689
3	890	2,57	2 287,30	6,6049	5 878,36	16,9746	43,6247	15 107,40	112,1155	288,1371	792 100
4	969	2,68	2 596,92	7,1824	6 959,75	19,2488	51,5869	18 652,09	138,2526	370,5164	938 961
5	689	2,24	1 543,36	5,0176	3 457,13	11,2394	25,1763	7 743,95	56,3948	126,3241	474 721
6	610	2,10	1 281,00	4,4100	2 690,10	9,2610	19,4481	5 649,21	40,8410	85,7661	372 100
7	552	1,99	1 098,48	3,9601	2 185,98	7,8806	15,6824	4 350,09	31,2080	62,1039	304 704
8	457	1,76	804,32	3,0976	1 415,60	5,4518	9,5951	2 491,47	16,8875	29,7221	208 849
9	404	1,66	670,64	2,7556	1 113,26	4,5743	7,5933	1 848,02	12,6049	20,9242	163 216
10	372	1,58	587,76	2,4964	928,66	3,9443	6,2320	1 467,28	9,8466	15,5575	138 384
11	347	1,52	527,44	2,3104	801,71	3,5118	5,3379	1 218,59	8,1137	12,3327	120 409
12	305	1,40	427,00	1,9600	597,80	2,7440	3,8416	836,92	5,3782	7,5295	93 025
13	290	1,34	388,60	1,7956	520,72	2,4061	3,2242	697,77	4,3204	5,7893	84 100
14	261	1,27	331,47	1,6129	420,97	2,0484	2,6014	534,63	3,3039	4,1959	68 121
15	246	1,22	300,12	1,4884	366,15	1,8158	2,2153	446,69	2,7026	3,2971	60 516
15	8066	28,37	17 065,29	57,3959	37 981,53	123,1311	276,9363	87 899,11	645,7329	1 546,3244	5 222 144

4-е приближение.

$$(0,5) = [H^5] = 645{,}7329; \quad (0,6) = [H^6] = 1\,546{,}3244;$$

$$(1,4) = (0,5) - q_1(0,4) = 645{,}7329 - 1{,}89133 \cdot 276{,}9363 = 121{,}9540;$$

$$(1,5) = (0,6) - q_1(0,5) = 1\,546{,}3244 - 1{,}89133 \cdot 645{,}7329 = 325{,}0284;$$

$$(2,3) = (1,4) - q_2(1,3) - p_2(0,3) =$$
$$= 121{,}9540 - 2{,}00733 \cdot 44{,}0543 - 0{,}249253 \cdot 123{,}1311 = 2{,}8317;$$

$$(2,4) = (1,5) - q_2(1,4) - p_2(0,4) =$$
$$= 325{,}0284 - 2{,}00733 \cdot 121{,}9540 - 0{,}249253 \cdot 276{,}9363 = 11{,}1993;$$

$$p_3 = \frac{(2,2)}{(1,1)} = \frac{0{,}4888}{3{,}7388} = 0{,}130737;$$

$$q_3 = \frac{(2,3)}{(2,2)} - \frac{(1,2)}{(1,1)} = \frac{2{,}8317}{0{,}4888} - \frac{14{,}5763}{3{,}7388} = 1{,}89451;$$

$$(3,3) = (2,4) - q_3(2,3) - p_3(1,3) = 11{,}1993 - 1{,}89451 \cdot 2{,}8317 - 0{,}130737 \cdot 44{,}0543 = 0{,}0751$$

$$\varphi_2 = (H - q_3)\varphi_2 - p_3\varphi_1 = (H - 1{,}89451) \cdot (H^2 - 3{,}89866\,H +$$
$$+ 3{,}54728) - 0{,}130737\,(H - 1{,}89133) = H^3 - 5{,}79317\,H^2 + 10{,}80260\,H - 6{,}47309;$$

$$A_3 = \frac{[H^3 Q] - (0,3)\,A_0 - (1,3)\,A_1 - (2,3)\,A_2}{3{,}3} =$$

$$= \frac{87\,899{,}11 - 123{,}1311 \cdot 537{,}7333 - 44{,}0543 \cdot 484{,}059 - 2{,}8317 \cdot 126{,}944}{0{,}0751} = 40{,}6125.$$

Следовательно:

$$A_3\varphi_3(H) = 40{,}6125\,(H^3 - 5{,}79317\,H^2 + 10{,}80260\,H - 6{,}47309) =$$
$$= 40{,}6125\,H^3 - 235{,}276\,H^2 + 438{,}721\,H - 262{,}888,$$

и в четвертом приближении:

$$Q = A_0\varphi_0(H) + A_1\varphi_1(H) + A_2\varphi_2(H) + A_3\varphi_3(H) =$$
$$= 72{,}520 - 10{,}851\,H + 126{,}944\,H^2 + 40{,}6125\,H^3 - 235{,}276\,H^2 + 438{,}721\,H - 262{,}888$$

или

$$Q = -190{,}368 + 427{,}870\,H - 108{,}332\,H^2 + 40{,}613\,H^3,$$

$$[\lambda\lambda]_3 = [\lambda\lambda]_2 - (3,3)\,A_3^2 = 860 - 0{,}0751 \cdot 40{,}6125^2 = 736;$$

$$\mu_3 = \sqrt{\frac{[\lambda\lambda]_3}{n}} = \sqrt{\frac{736}{15}} = 7{,}01.$$

Как видно, средняя ошибка мало уменьшилась по сравнению с ошибкой третьего приближения ($\mu = 7{,}57$). Это показывает, что дальнейшие вычисления не дадут ощутительного ее уменьшения и можно было бы остановиться на уравнении, полученном в третьем приближении, тем более, что средняя относительная ошибка его получается весьма небольшой:

$$\frac{\mu_2}{\frac{[Q]}{n}} = \frac{7{,}57}{537{,}73} = 1{,}4\%.$$

Ошибка могла бы быть сведена к нулю только в том случае, если бы все точки располагались на кривой, что, очевидно, невозможно при некоторой разбросанности их. Эта разбросанность и определяет предел минимального достижимого отклонения.

На рис. 240 показаны кривые расходов, соответствующие четырем найденным приближениям. Параболы 2-й и 3-й степени почти сливаются.

Пользуясь теми же основными данными таблицы на стр. 226, можно найти уравнение параболы 2-го порядка и обычным способом, изложенным в начале параграфа.

15*

Нормальные уравнения (175) — (177) будут иметь вид:

1) $15a + 28{,}37\,b + 57{,}3959\,c = 8\,066$;
2) $28{,}37a + 57{,}3959b + 123{,}1311c = 17\,065{,}29$;
3) $57{,}3959a + 123{,}1311b + 276{,}9363c = 37\,981{,}53$.

Удобнее всего решать эти уравнения следующим образом:
Разделим каждое почленно на коэфициенты при a:

1) $a + 1{,}891333b + 3{,}826393c = 537{,}7333$;
2) $a + 2{,}023119b + 4{,}340188c = 601{,}5260$;
3) $a + 2{,}145295b + 4{,}825020c = 661{,}7465$.

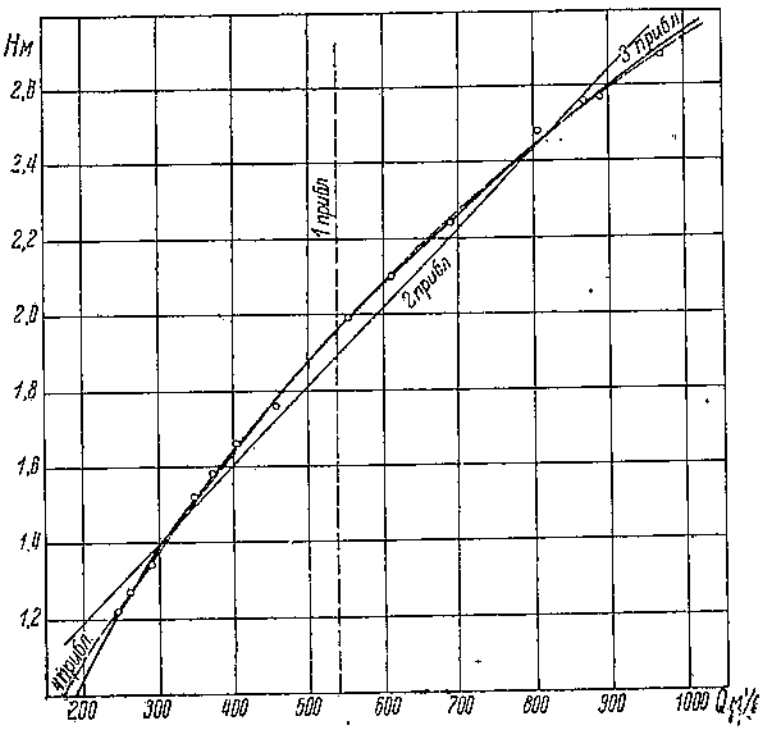


Рис. 240. Кривые расходов р. Нарын по методу Чебышева.

Вычтем из второго первое и из третьего второе:

$$0{,}131786b + 0{,}513795c = 63{,}7927;$$
$$0{,}122176b + 0{,}484832c = 60{,}2205,$$

и опять разделим почленно на коэфициенты при b:

$$b + 3{,}898706c = 484{,}0628;$$
$$b + 3{,}968308c = 492{,}8997.$$

Вычитая из второго первое, найдем

$$0{,}069602c = 8{,}8369,$$

откуда

$$c = 126{,}963.$$

Тогда

$$b = 484{,}0628 - 3{,}898706 \cdot 126{,}963 = -10{,}930$$

$$a = 537{,}733 + 1{,}39133 \cdot 10{,}930 - 3{,}826393 \cdot 126{,}963 = 72{,}594.$$

Уравнение кривой расходов:

$$Q = 72594 - 10{,}930\ H + 126{,}963\ H^2.$$

Небольшое расхождение коэфициентов этого уравнения с полученными по способу *Чебышева* в третьем приближении объясняется неточностью наших вычислений.

Аналитические способы установления кривых расходов отличаются значительной сложностью вычислений, что и является главной причиной, по которой обычно преимущество отдается графо-аналитическим и графическим приемам. Вычисление коэфициентов уравнений по способу наименьших квадратов (включая способ *Чебышева)* требует, кроме того, безукоризненной правильности подсчетов и определения входящих в них величин с большим числом знаков, так как процесс выкладок основан, главным образом, на исчислении разностей чисел. В то же время применение этих методов приводит к единственному свободному от субъективизма решению задачи, а способ *Чебышева* выделяется своей стройностью и идейной целесообразностью.

С точки зрения практики сложность аналитических методов является основным их недостатком, так как необходимо иметь в виду самый характер кривой расходов: влияние на нее целого ряда факторов, нарушающих однозначность зависимости, а также неточностей измерений и их обработки. В связи с этим более целесообразными являются простые, хотя бы и менее точные методы установления кривых расходов, главным образом графические.

§ 62. Кривые расходов при неустойчивом русле. При неустойчивом русле одной и той же высоте горизонта воды по рейке в разные моменты времени могут соответствовать разные площади поперечного сечения потока и разные очертания линии дна. При более низком уровне вследствие размыва могут получаться даже бо́льшие площади сечения, чем при более высоких горизонтах, когда в русле имеются отложения наносов. Неустойчивость русла поэтому приводит к разбрасыванию точек на чертеже и затруднительности проведения кривой.

Чем менее устойчиво русло, тем шире и беспорядочнее разбрасываются точки. Если к тому же имеют место значительные колебания продольного уклона поверхности потока и изменение шероховатости русла, то может получиться полная неопределенность в установлении кривой.

На многих реках не удается найти для гидрометрического створа участка с устойчивым руслом, и тогда с этим обстоятельством приходится считаться как при организации работ, так и при обработке данных: необходимо производить учащенные измерения расходов (иногда каждый день) и применять особые методы установления кривой расходов и пользования ею. Особенно ненадежным является установление кривой по малому числу точек, которые могут быть случайными, и экстраполяция кривой за пределы наблюденных расходов и во времени (пользование кривой для периодов, предшествующих периоду измерений расходов и следующих за ним).

В зависимости от степени изменчивости русла и разбросанности точек, можно указать на следующие применяемые на практике приемы:

1) построение обычных средних кривых зависимости расходов от высоты уровня на водомерном посту;

2) построение кривых зависимости расходов от средней или наибольшей глубины сечения;

3) построение средней кривой типа 1 путем приведения всех расходов к одному «основному» сечению.

Первый способ применим в том случае, когда точки расходов на чертеже дают ясно выраженную, хотя бы и широкую полосу, позволяющую установить кривую одним из приемов, рассмотренных раньше. Так как отклонения действительно измеренных расходов в обе стороны от кривой могут быть значительны, то при пользовании такой кривой и определении по ней расходов на каждый день вводятся особые поправки.

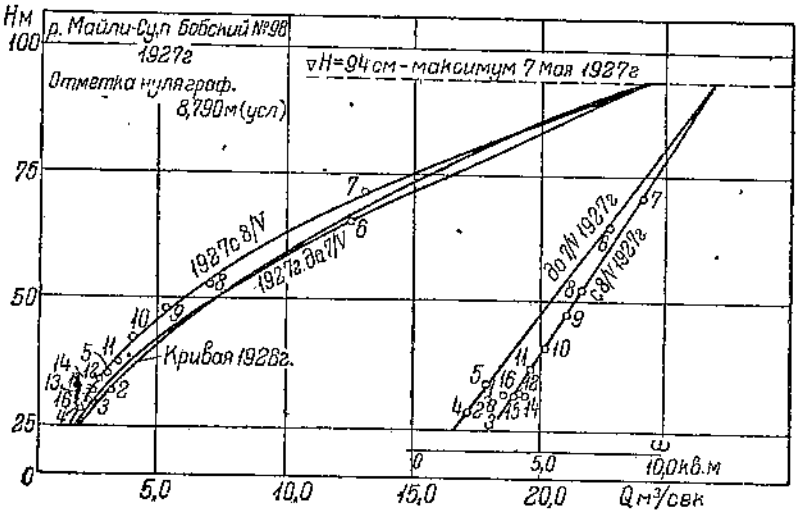


Рис. 241. Кривые расходов при неустойчивом русле.

Если точки измерений охватывают длительный период (например, несколько лет), а изменения русла совершаются медленно и плавно, то может оказаться рациональным установить вместо одной общей кривой несколько отдельных кривых, относя каждую к определенному отрезку времени.

Для этого необходимо отметить хронологический порядок точек, например, нумеруя их по порядку и обозначая расходы разных периодов (лет) различными значками (пустыми и сплошными кружками, треугольниками, крестиками и т. п.). Полезно также для определения границ применимости кривых построить кривые $\omega = \varphi(H)$ и $V = f(H)$. Так как изменения русла наиболее интенсивно происходят чаще всего при паводках или, наоборот, при наинизших расходах, то кривые обычно имеют общие переходные точки при высоких или при низких горизонтах. Иногда таким образом удается установить систему кривых, переходящих одна в другую.

Такие кривые показаны, например, на рис. 241, не требующем особых пояснений.

Если проведена одна средняя кривая через разбросанные точки, то, пользуясь ею непосредственно, мы находили бы расходы, соответствующие некоторому воображаемому среднему состоянию русла, которое только в отдельные моменты может отвечать действительности, давая величины измеренных расходов (когда точки попадают на кривую).

Предполагая, что отдельные расходы определены безошибочно, мы должны признать, что отклонения точек от кривой имеют причиной изменения русла или других факторов, которые могут с ними сочетаться (изменения уклона, шероховатости и пр.). На этом и основаны обычно применяемые методы пользования такими кривыми.

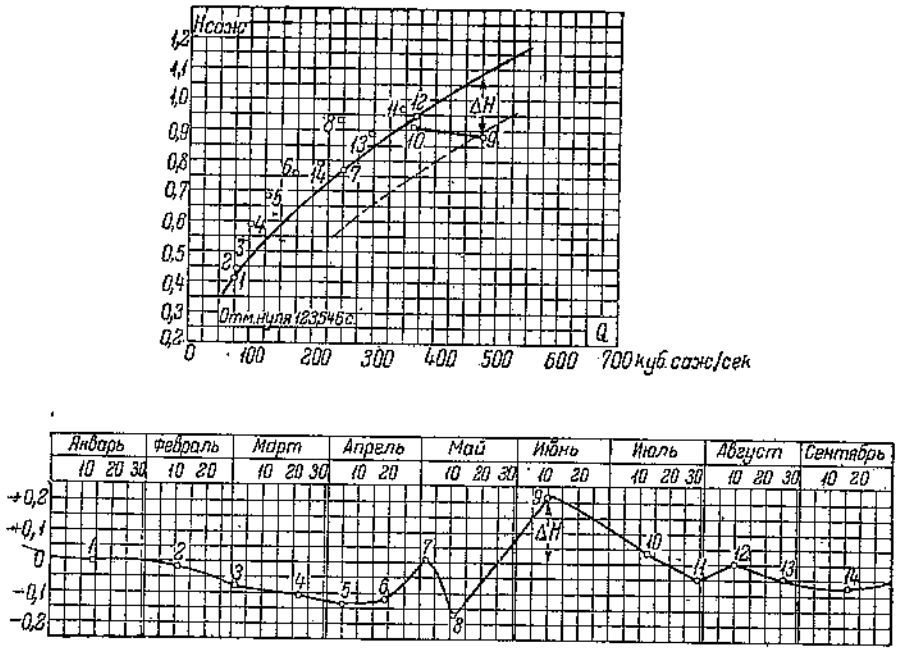


Рис. 242. Определение поправок по методам Стаута и Болстера.

Метод *Стаута* заключается в приданин к наблюденным уровням поправок, благодаря которым действительно измеренные расходы совпадают с расходами, получаемыми по исправленным уровням из кривой. Последняя рассматривается при этом как приближенная кривая, вследствие неустойчивости русла и других факторов. Поправки уровня для дней, когда расходы не измерялись, находятся интерполяцией — по *графику поправок*.

На рис. 242 представлена кривая расходов р. Аму-Дарьи у ст. Керкинской за 1911 г. и к ней график поправок *Стаута*. Например, для расхода № 9 (10 июня) величина поправки выражается вертикальным расстоянием ΔH точки 9 до кривой расходов. Ее нужно прибавить к наблюденному уровню, чтобы получить по кривой действительный расход, поэтому эта поправка положительная и на гра-

фике поправок в день измерения расхода отложена вверх от нуля. Для расхода № 8 (11 мая) поправка отрицательная и отложена вниз от нуля и т. д. Точки на графике соединены между собой плавной линией, благодаря чему можно найти поправку на каждый день и, исправив наблюденный уровень в этот день, получить по нему из кривой соответствующий расход.

Другой метод — *Болстера* — заключается в проведении одной или нескольких «*стандартных*» кривых расходов, сообразно с хронологическим порядком точек и изменениями русла (как указано в начале параграфа). Каждая кривая применяется для нахождения расходов по уровням, наблюденным между сроками измерения первого и последнего расходов, принятых во внимание при проведении кривой. Для дней между двумя соседними измерениями расходов точки этих последних соединяются между собою линией, которая делится на равные части, в соответствии с числом дней между измерениями, в предположении, что изменения в условиях движения потока совершались равномерно. Затем кривая передвигается параллельно самой себе вверх или вниз настолько, чтобы она прошла через деление, отвечающее дню, для которого ищется расход, и в этом ее положении расход находится по наблюденному уровню.

Допустим (рис. 242), что нужно найти расход на 13 июня, когда средний за сутки уровень был равен 0,95 саж. Поправка уровня по *Стаусу* из графика на этот день + 0,21 саж., следовательно исправленный уровень: 0,95 + 0,21 = = 1,16 саж. По нему из кривой расход равен 540 куб. саж. в сек.

По *Болстеру* соединяем прямой линией точки расходов 9 (10 июня) и 10 (13 июля) и делим ее на 33 части (33 дня). Опускаем кривую расходов параллельно самой себе так, чтобы она прошла через деление, соответствующее 13 июня. Тогда уровню 0,95 саж. отвечает расход 525 куб. саж. в сек.

При пользовании методом *Болстера* удобно приготовить специальные лекала, легко позволяющие передвигать кривые вверх и вниз по вертикальному направлению.

Разумеется, применение обоих способов ограничивается периодом измерений расходов, которые желательно производить возможно чаще.

В некоторых случаях удается уменьшить разбросанность точек и сузить образуемую ими полосу, откладывая по оси ординат не уровни воды, а *средние глубины* потока, которые в большинстве случаев можно принять равными значениям гидравлического радиуса (как уже отмечалось в предыдущих параграфах).

У горных рек с неустойчивым руслом относительные изменения уклона, вообще говоря, слабее, чем у равнинных рек с малым продольным уклоном, и связь между расходами и средними глубинами может давать лучший результат, нежели обычный способ. Определяя отметку среднего дна как разность между отметкой горизонта воды и средней глубиной, мы можем ею характеризовать высотные изменения русла. Принимая за ось абсцисс время (календарь), откладывая по ординатам отметки среднего дна, вычисленные из промеров, и соединяя полученные точки плавной кривой (рис. 243), будем иметь график, дающий отметки среднего дна для любых промежуточных моментов времени. Если на том же графике нанести ход колебаний уровня на створном водомерном посту, то это даст возможность находить и средние глубины для любого дня.

Главным недостатком этого способа является необходимость иметь поперечное сечение русла с плавно и медленно изменяющейся шириной, так как при наличии террас (уступов) будут получаться резкие скачки средней глубины вследствие большого изменения ширины при малом изменении площади поперечного сечения. Можно было бы в этом случае задаться некоторой постоянной шириной (например, максимальной или средней), но это вносит большую условность в обработку. В некоторых случаях, когда изменения русла происходят только во время высоких вод, выгодно строить две кривые расходов: одну по средней глубине — для высоких вод, другую по рейке — для меженного и зимнего периодов.

Совершенно аналогично можно строить кривую расходов, откладывая по оси

ординат *максимальную глубину* в сечении. Иногда этот способ дает хорошие результаты и находит применение. Так же, как и в предыдущем случае, строится график изменения максимальных глубин во времени, позволяющий находить последние на любой день между промерами.

Способ приведения расходов к *основному сечению* заключается в следующем. Одно из примерных сечений в створе принимается за основное, и для него строится по точкам кривая $\omega = \varphi(H)$. Затем на тот же чертеж наносятся точки по координатам ω и H для всех измеренных расходов. Проводя через любую точку вертикаль до пересечения с кривой, находим высоту уровня, при которой площадь основного сечения равна данной. Этот уровень и приписываем расходу, площадь живого сечения которого мы таким образом привели к избранному основному сечению, а затем по исправленным уровням и действительным величинам расходов строим обычную кривую.

Пример такого построения приведен на рис. 244. Слева наложены точки по измеренным расходам и наблюденным уровням. В средней части чертежа проведена кривая $\omega = \varphi(H)$ для сечения, принятого за основное, и показаны точки площадей живых сечений, соответствующих измеренным расходам. В правой части точки тех же расходов отнесены к исправленным уровням и через них проведена средняя кривая. Эффект способа в данном примере весьма нагляден: точки, чрезвычайно разбросанные в левой части, дали по исправленным уровней отчетливое общее направление кривой.

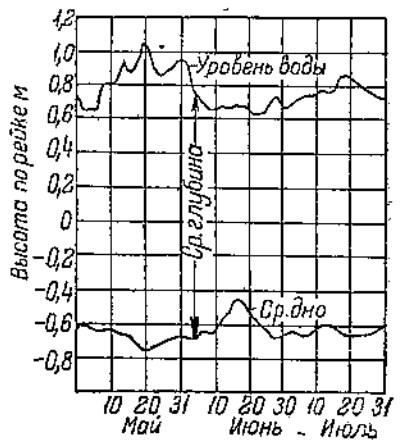


Рис. 243. График изменения высоты среднего дна.

Чтобы найти расходы в дни, когда таковые не определялись, надо поступить по предыдущему, а именно: зная поправки уровня для отдельных расходов, построить по ним график изменения поправок во времени. Из него могут быть найдены поправки к наблюденным уровням на каждый день, а по исправленным уровням — и расходы по кривой.

Этот способ предполагает, что любой измеренный расход проходит в основном сечении с той же средней скоростью, что и в сечения, имевшем место при определении расхода, т. е. с теми же продольным уклоном и смоченным периметром.[1] Иначе говоря, мы допускаем, что действительное сечение гидравлически равноценно сечению той же площади в основном профиле.

Самое проведение кривых зависимости расходов от глубин для исправленных уровней возможно при помощи ранее рассмотренных методов, хотя чаще всего в этих случаях кривые проводятся элементарным графическим путем, по центрам тяжести групп точек.

§ 63. Расходы при переменном уклоне. Непостоянство продольного уклона потока, как это уже отмечалось, ведет к разбросанности точек кривой $Q = F(H)$ даже при устойчивом русле. Если налицо правильное призматическое русло и отсутствуют причины, вызывающие подпор в створе, мы все же постоянно имеем дело с неустановившимся режимом, особенно ярко выражающимся при быстрых подъемах и опусканиях уровня во время прохождения паводков (см. рис. 229).

Если расходы определялись во время прохождения волны паводка,

[1] Так как в формуле *Шези* $V = C\sqrt{Ri}$ мы можем считать, согласно большинству выражений для C, что этот коэфициент не зависит от уклона I, а шероховатость неизменна.

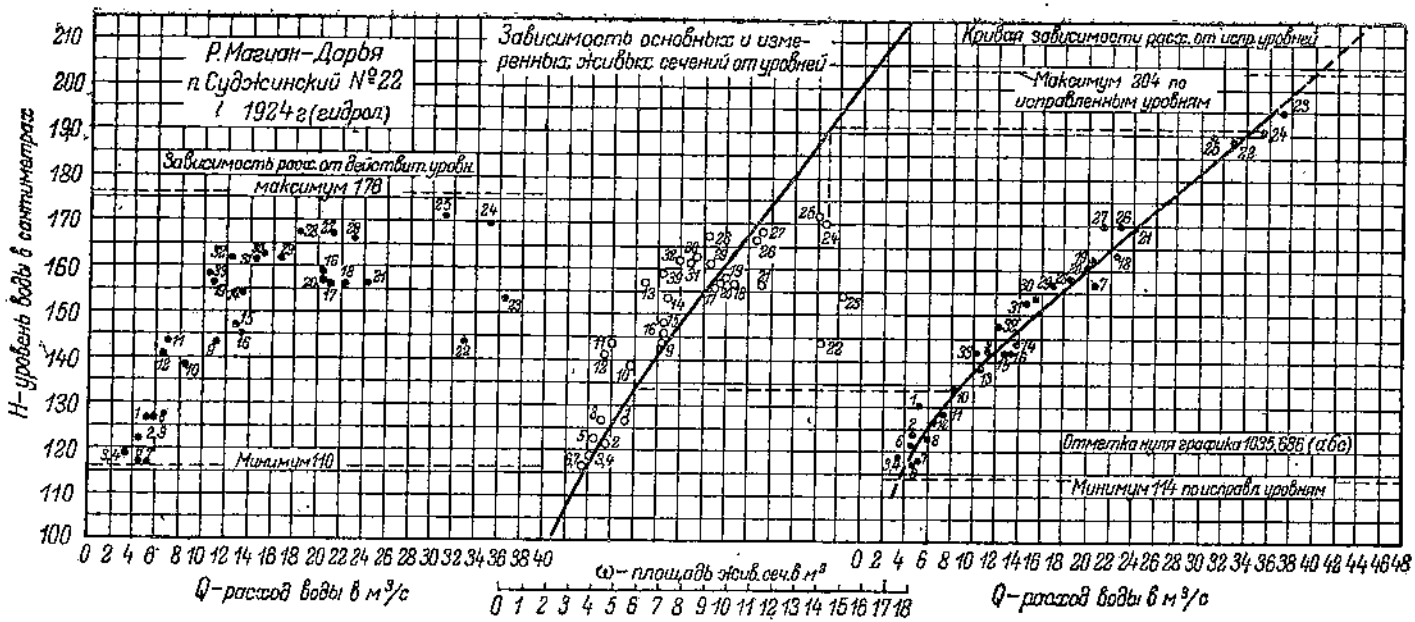


Рис. 244. Приведение расходов к основному сечению.

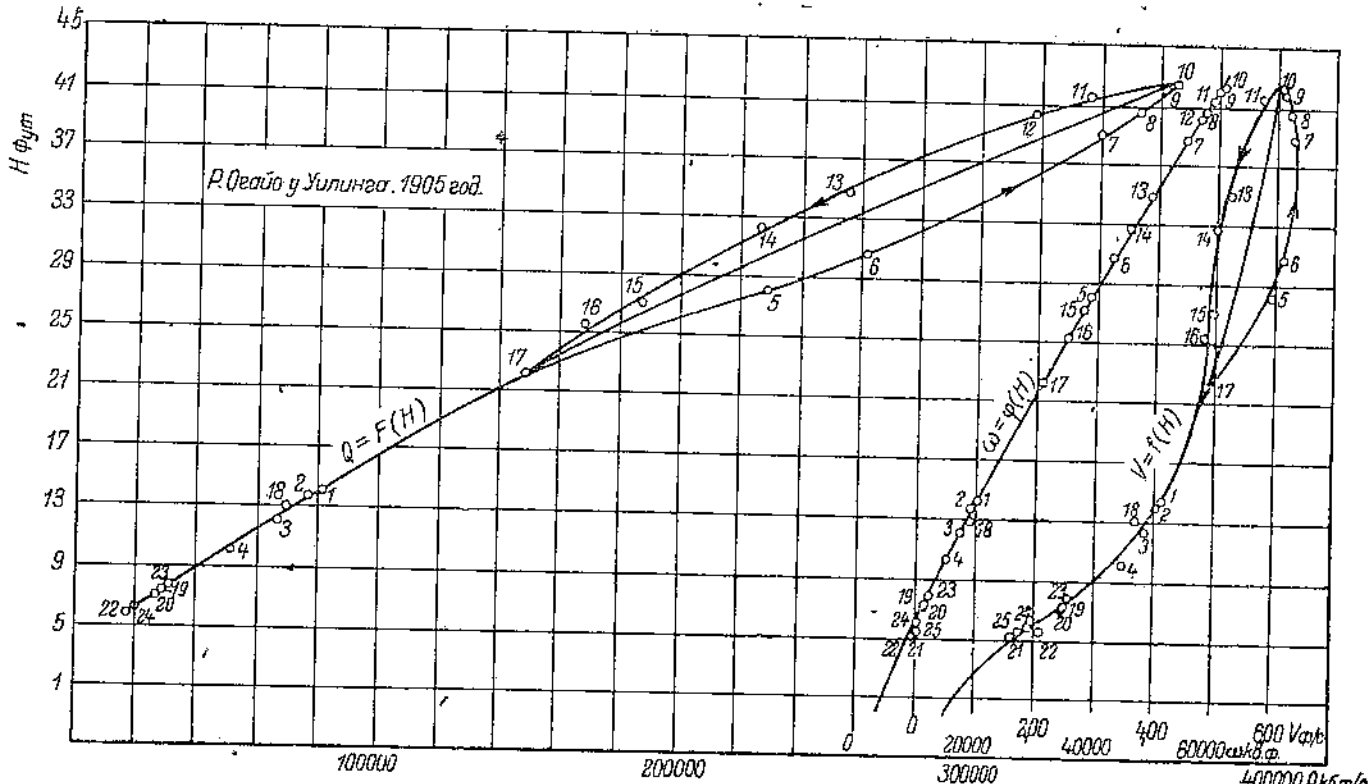


Рис. 245. Кривые расходов при подъеме и спаде уровней.

сначала в ее лобовой, а затем в тыловой части, то нередко получается картина, изображенная на рис. 245. Кривая $\omega = \varphi(H)$, на которую все точки прекрасно ложатся, указывает на весьма устойчивое русло. Точки расходов 5—8 при подъеме уровня и точки 11—16 при спаде дают две ясно выраженные ветви (то же на кривой средних скоростей), причем расходы на подъеме больше расходов на спаде, как это и должно быть в соответствии с изменением поверхностного уклона во время прохождения волны паводка (рис. 229).[1] Средняя кривая, про-

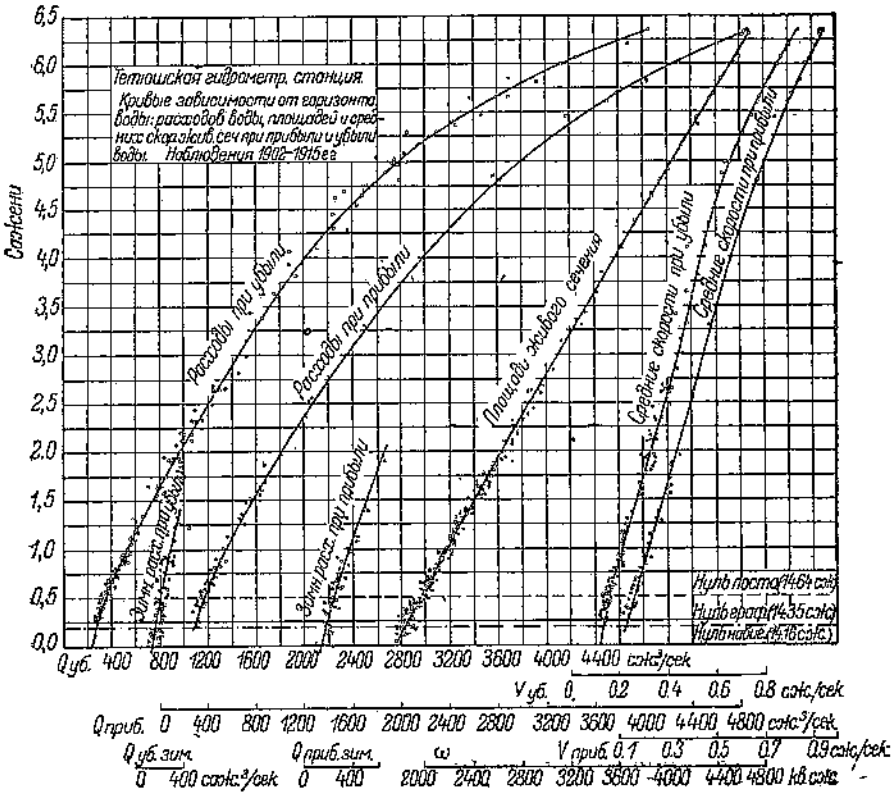


Рис. 246. Кривые расходов р. Волги.

веденная между обеими ветвями, дает значительные отклонения от измеренных расходов в ту и другую сторону.

По этой причине иногда прибегают к построению двух кривых расходов: одной для *подъема*, другой для *спада* горизонтов воды. Такие кривые за 14 лет для р. Волги у Тетюшской гидрометрической станции показаны на рис. 246.[2]

---

[1] Расходы 5—17 охватывают период с 20 по 27 марта (в некоторые дни расходы определены дважды). Во время их измерения подъем уровня в час достигал 0,68 фута (0,21 м), падение — 0,40 фута (0,12 м).

[2] Для того, чтобы точки не смешивались, горизонтальные масштабы кривых сдвинуты один по отношению к другому.

Как видно, и здесь русло довольно устойчивое. Разность расходов по кривым при убыли и прибыли воды при горизонте 5,0 саж. превосходит 200 куб. саж. в сек.; при малых расходах она уменьшается, приближаясь к нулю.

Изменения уклона при прохождении отдельной волны паводка имеют более или менее закономерный характер. Если же соединять все измерения, охватывающие серию паводков различной высоты и длительности, то естественно получается некоторая разбросанность точек.

То же самое в еще большей степени имеет место, когда изменения уклона происходят вследствие переменного подпора, вызываемого, например ниже по течению расположенной плотиной, колебаниями уровня в водоеме, куда впадает поток, паводком на притоке ниже створа и т. п. Изменения уклона от этих причин могут быть весьма значительными, приводя к такому рассеянию точек на чертеже, что проведение даже средних кривых становится затруднительным.

Знание величины уклона, определяемой из водомерных наблюдений на уклонных постах, позволяет ввести поправки и выравнять до некоторой степени точки на чертеже.

Из выражения для расхода (140):

$$Q = \omega C \sqrt{RI}$$

следует, что при одном и том же уровне и неизменяемом русле расходы относятся как корни квадратные из уклонов:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt{I_1}}{\sqrt{I_2}}. \tag{181}$$

Основываясь на этом, *Холль* (1908 г.) предложил следующий метод. Полагая величину гидравлического радиуса по длине участка между постами, при помощи которых определяется уклон, неизменной, обозначим падение уровня воды на этом участке через h. Среднюю за некоторый период наблюдений величину падения $h_н$ будем считать нормальной. Ей соответствует при каждом горизонте воды в створе один *нормальный* расход $Q_н$. При данном горизонте для расхода Q_i и падения h_i соотношение (181) можно написать таким образом:

$$\frac{Q_i}{Q_н} = \sqrt{\frac{h_1}{h_н}},$$

так как $I = \frac{h}{L}$, где L — расстояние между постами.

Отсюда

$$Q_н = Q_i \sqrt{\frac{h_н}{h_i}}. \tag{182}$$

Перечислив по этой формуле все расходы в нормальные, по этим последним и строим *нормальную кривую* расходов $Q_н = F(H)$. Если нужно из нее определить расход в день, когда измерения не производились, то, имея наблюденные величины H и h_i, находим сначала по

уровню H нормальный расход $Q_н$ по кривой и затем обратным путем из формулы (182) расход действительный:

$$Q_i = Q_н \sqrt{\frac{h_i}{h_н}}.$$

Для облегчения подсчетов обычно составляется таблица значений

$$\sqrt{\frac{h_i}{h_н}}.$$

Другой метод (*Джонса*), основанный также на соотношении (181), заключается в следующем: пусть Q_0 и I_0 обозначают расход и уклон при устойчивом стоянии горизонта, Q_1 и I_1 — те же величины при том же горизонте, но во время подъема или спада, когда $I_1 \neq I_0$. Тогда можно считать, что уклон I_1 слагается из основного уклона I_0 и добавочного уклона ΔI_0 (который может быть положительным и отрицательным), связанного с изменением скорости течения:

$$\frac{Q_0}{Q_1} = \frac{\sqrt{I_0}}{\sqrt{I_0 + \Delta I_0}}.$$

Этот добавочный уклон (рис. 229) представляет предел отношения изменения горизонта воды на посту за некоторый малый промежуток времени к расстоянию, на которое за то же время переместилось вниз по течению сечение потока с уклоном I_1. Принимая промежуток времени в 1 секунду, можно приближенно положить:

$$\Delta I_0 = \frac{\Delta H}{V_0} = \frac{K'' \Delta H}{V},$$

где ΔH есть секундное изменение (подъем или падение) горизонта воды в створе, V_0 — средняя поверхностная скорость, V — средняя скорость в сечении и K'' — коэфициент, связывающий скорости V и V_0 (по американским данным величина коэфициента K'' для широких рек около 0,9, для небольших потоков — около 0,85).

Следовательно:

$$\frac{Q_0}{Q_1} = \frac{\sqrt{I_0}}{\sqrt{I_0 + \frac{K'' \Delta H}{V}}}. \qquad (183)$$

Величина ΔH подсчитывается на основании частых наблюдений над уровнем (например, через час) или из лимнограмм.

Для пользования формулой (183) предварительно должна быть установлена кривая расходов $Q_0 = F(H)$ при установившемся режиме и соответствующая ей кривая нормальных уклонов $I_0 = f(H)$. Кроме того, нужно иметь кривую $\omega = \varphi(H)$ для вычисления скоростей V.

Нахождение расходов Q_1 делается путем постепенных приближений. Пусть дана высота уровня H_1. По ней из кривой $Q_0 = F(H)$ находится расход Q_0 при устойчивом стоянии уровня, из кривой $\omega = \varphi(H)$ — площадь живого сечения и из кривой $I_0 = f(H)$ — нормальный уклон I_0.

В первом приближении $V' = \frac{Q_0}{\omega}$ и из (183):

$$Q'_1 = Q_0 \frac{\sqrt{I_0 + \frac{K'' \Delta H}{V'}}}{\sqrt{I_0}}.$$

Во втором приближении

$$V'' = \frac{Q'_1}{\omega}$$

$$Q''_1 = Q_0 \frac{\sqrt{I_0 + \frac{K''\Delta H}{V''}}}{\sqrt{I_0}}$$

и т. д., постепенно уточняя скорость V и расход Q_1.

Таким образом оба приведенные способа исходят из одного и того же соотношения (181). Первый способ проще и общее, но для него нужно вести систематические ежедневные наблюдения на двух постах, которые по существу являются уклонными. Во втором способе эти наблюдения не нужны, но необходимо предварительно построить кривые расходов и нормальных уклонов для устойчивых уровней. Обе эти кривые могут быть установлены только в том случае, если гидрометрический створ не находится в сфере переменного подпора, источник которого находится ниже по течению, так как при этом даже устойчивые уровни не будут однозначно связаны с расходами и уклонами. Здесь может быть применен только способ *Холла*.

Следовательно второй способ сводится к введению поправок на неустановившееся движение при прохождении волны паводка и отсутствии подпора снизу; для построения кривых $Q_0 = F(H)$ и $I_0 = f(H)$ нужен длительный период измерений.

Нередко через точки, разбросанные в поле чертежа вследствие переменного уклона, проводится не одна кривая, а *серия кривых расходов*, из которых каждая кривая соответствует одному определенному уклону (рис. 247). Этот способ имеет тот недостаток, что при отборе расходов с одинаковым уклоном получается мало точек для проведения отдельных кривых, и последние становятся ненадежными. В этом случае, применяя способ *Холла*, можно использовать каждый расход для получения точек для разных кривых.

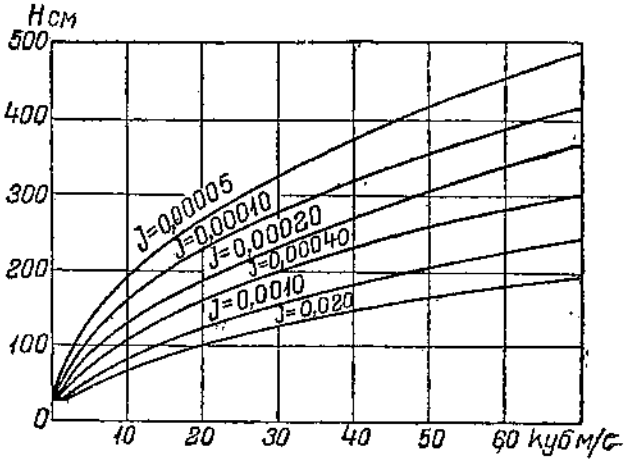


Рис. 247. Кривые расходов для разных уклонов.

§ 64. Зимние расходы. Точный учет зимних расходов представляет в большинстве случаев весьма трудную и сложную задачу вследствие появления в потоке переменных добавочных сопротивлений движению воды, связанных с зимним режимом и образованием льда.

Толщина поверхностного льда и вызываемое им давление, степень шероховатости нижней поверхности льда и присутствие под ним рыхлого губчатого льда, «донный» лед и зажоры, — все эти переменные и изменчивые факторы в сильной степени влияют на движение потока, осложняя зависимость между расходами и уровнями.

Так же, как и при переменном русле или подпоре, и в этом случае приходится увеличивать количество измерений расходов, чтобы

получить отвечающую действительности картину их изменения во времени.

Вследствие увеличения сопротивлений, для пропуска того же расхода, что и при открытом русле, требуется увеличение живого сечения или уклона потока. При длинном однообразном русле, замерзающем равномерно по всей длине, обычно наблюдается лишь общее поднятие уровня воды при незначительном изменении уклона.

Когда же сечение изменяется и уклон ломается, замерзание происходит неравномерно. На участках с быстрым течением появляются благоприятные условия для образования «донного» льда, вызывающего зажоры и резкие изменения естественных уклонов и уровней.

По этим причинам зимние расходы при наложении их на кривую расходов для свободного русла в большинстве случаев ложатся выше последней, т. е. при одном и том же уровне зимние расходы почти всегда меньше расходов свободного русла. В зависимости от местных условий и характера их изменчивости в одних случаях могут получаться достаточно ясно выраженные *зимние кривые* расходов, в других — полное отсутствие какой-либо закономерности.

На вышеприведенном рис. 246 показаны также зимние кривые расходов для Волги у Тетюшей. В соответствии с двумя кривыми для навигационных расходов, и зимних кривых дано две: для прибыли и убыли воды.

Выделить и установить такие отдельные кривые удается сравнительно редко — при особо благоприятных условиях на участке русла и в ходе зимнего режима. В большинстве случаев точки сильно разбрасываются, и приходится прибегать к разным методам их выправления и интерполяции расходов между измерениями. Особенные трудности представляет установление расходов в переходные периоды — осеннего ледостава и весеннего вскрытия.

Нередко удается уменьшить рассеяние точек, относя расходы не к уровню воды в лунках, а к среднему уровню нижней поверхности льда, каковой способ рекомендуется, например, американскими инженерами.

В США и Швеции находит применение измерение зимних расходов на незамерзающих участках (в порогах, истоках из озер) с отнесением величин расходов к выше или ниже расположенным постоянным водомерным постам, с уровнями на которых и связываются расходы.

Иногда делаются попытки установить приближенную среднюю кривую для ряда лет по средним за целую зиму расходам и уровням, основываясь на допущении, что зимние добавочные сопротивления в сумме одинаковы для разных зим, чего в действительности, однако, не наблюдается.

Наконец, находят применение и летние кривые — непосредственно на незамерзающих участках или с введением тех или иных поправок.

Остановимся на некоторых методах, специфических для зимнего режима.

Полагая, что расходы измерены безошибочно, а отклонения точек от кривой (зимней или летней) обусловлены переменными зимними влияниями, можно применить для интерполяции расходов на каждый день выше рассмотренные методы *Стаута* и *Болстера*. Введение по-

правок *Стаута* при исчислении зимних расходов было впервые применено *Моисеенко* в 1912 г. при Камско-Иртышских изысканиях. При пользовании летней кривой поправка уровня перед ледоставом и после вскрытия равна нулю, в течение же зимнего периода она имеет большей частью отрицательную величину. Если русло неустойчивое, то поправка и в начале и в конце зимнего периода может отличаться от нуля, отражая в себе сумму влияний неустойчивости русла и переменных зимних факторов.

В случае подпора от заторов ниже по течению, учитываемого предыдущими способами суммарно, для зимней кривой может быть испробован также метод *Холла*, требующий однако наличия уклонных постов.

В. Хойтом в 1912 г. предложен приближенный графический метод интерполяции зимних расходов в соответствии с ходом температуры воздуха, имея в виду, что последняя является основным фактором зимнего режима и ледообразования. Определяя «подпор от льда» и его изменение по времени, *Хойт* уменьшает наблюденные уровни на величину подпора и затем находит по ним расходы из летней кривой. Величина подпора для каждого измеренного расхода определяется как разница двух уровней: уровня, отвечающего данному расходу по летней кривой, и наблюденного при измерении расхода (т. е. так же, как поправка *Стаута*).

С этой целью (рис. 248) строятся график колебаний уровней за зимний период и под ним — график колебания средних суточных температур. Второй график строится таким образом, что отрицательные температуры откладываются вверх от нуля, а положительные вниз. Кроме того, иногда строится график осадков.

По измеренным расходам находятся уровни из летней кривой и накладываются на первый график. Разницы между ними и действительными уровнями (подпор льда) служат опорными точками для графика подпора (внизу).

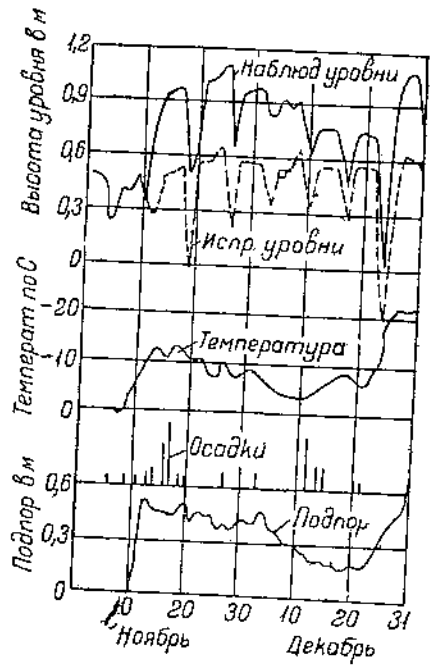


Рис. 248. Исправление зимних уровней по методу Хойта.

Через последние проводится кривая того же общего очертания, что и кривая температур, принимая во внимание осадки в виде дождя, данные о зажорах и пр. На основании этой кривой (ее ординат) строится исправленный график уровней, по которому при помощи летней кривой расходов и определяются все промежуточные расходы.

Как видно, этот метод отличается значительным субъективизмом и требует большой опытности от лица, производящего обработку. Точность результатов зависит от частоты измерений расходов, а также устойчивости зимних условий. Особенно затруднителен учет их влияния на подпор в периоды перехода от теплой к холодной погоде и обратно.

В практике русских исследований уже довольно давно применялся *переходный коэфициент* от летних расходов к зимним, при помощи которого зимние расходы при одном и том же уровне, что и летние, определялись из кривой для открытого русла:

$$Q_{зим} = KQ_{лет.} \qquad (184)$$

Как ясно из всего вышесказанного, этот коэфициент должен быть весьма переменным, находясь в зависимости от характера русла и потока, климатических условий и изменяясь в течение зимнего периода в связи с ходом метеорологических элементов. Исследования показывают, что, быстро падая после замерзания и возрастая к моменту весеннего ледохода, он в течение зимы в одних случаях постепенно уменьшается, в других увеличивается.

Приводим пределы его колебаний по некоторым данным:

для р. Волхова	0,37 — 0,65
„ „ Меты	0,30 — 0,70
„ „ Невы	0,33 — 0,56
„ „ Волги (среднее течение)	0,29 — 0,66
„ „ Днепра (порожистая часть)	0,27 — 1,00
„ „ Чусовой	0,14 — 0,36
„ Енисея (у Красноярска)	0,07 — 0,10
„ некоторых рек США	0,16 — 0,62

В местностях с суровой зимой (р. Енисей) эти коэфициенты очень низки. На р. Миассе (восточный склон Урала) наблюдались коэфициенты 0,02—0,03, а большая р. Яна в Якутии промерзает до дна ($K = 0$.).

Колупайло (1938 г.) предложил вместо введения поправок *Стаута* подсчитывать зимние расходы, пользуясь уточненными значениями этого коэфициента, переменными во времени:

$$K = 0{,}616\,\frac{C'}{C}\left(1 - \frac{e}{H'}\right)^{1{,}7}, \qquad (185)$$

где C и C' — коэфициенты *Шези* соответственно для русла открытого и при ледяном покрове, e — средняя глубина погружения ледяного покрова, H' — средняя глубина потока.[1]

Этой формулой учитывается изменение в течение зимнего периода шероховатости $\left(\frac{C'}{C}\right)$ и уменьшение площади живого сечения вследствие наличия льда (член в скобках). Особенно сильно влияет на величину K изменение шероховатости.

---

[1] Исходя из формулы вида:

$$V = CR^{0{,}7}I^{0{,}5}$$

и полагая в ней $R = H'$, найдем для открытого русла:

$$Q = BH'^{1{,}7}CI^{0{,}5}.$$

Для русла при наличии ледяного покрова и той же высоте уровня воды:

$$\omega' = B(H' - e),$$

$$R' = \frac{H' - e}{2}$$

(так как смоченный периметр $\chi = \sim 2B$).

Поэтому

$$Q' = BC'\left(\frac{1}{2}\right)^{0{,}7}(H' - e)^{1{,}7}I^{0{,}5},$$

откуда

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{C'}{C}\left(\frac{1}{2}\right)^{0{,}7}\left(\frac{H' - e}{H}\right)^{1{,}7}\left(\frac{I'}{I}\right)^{0{,}5}.$$

Предполагая $I' = I$, получим выражение (185).

Практически при вычислении зимних расходов по методу *Колупайло* коэфициент K находится по измеренным в зимний период расходам и расходам при том же уровне, получаемым из кривой расходов для открытого русла $\left(K = \frac{Q_{зим}}{Q_{лет}}\right)$ и для него строится график, подобный графикам поправок *Стаута* или подпора по *Хойту*, откуда берутся коэфициенты на каждый день и умножаются на величину расхода, взятую по кривой для открытого русла. Для облегчения умножения строится пучок кривых расходов, каждая из которых соответствует определенной величине коэфициента K.

Как видно, этот метод значительно сложнее метода *Стаута* и сводится к интерполяции коэфициентов K вместо поправок уровня. Сравнение обоих методов, сделанное *Колупайло* на частном примере, дало расхождение в величине среднего зимнего расхода всего 3,4%.

Былин и *Огиевский*, исходя из формулы *Шези* обычного вида (132) и выражая коэфициент этой формулы по *Маннингу* (143), в предположении, что шероховатость русла и льда одинакова, предложили для коэфициента K выражение:

$$K = 0{,}63\left(1 - \frac{e}{H}\right)^{1{,}7}\left(\frac{I'}{I}\right)^{0{,}5}\delta, \qquad (186)$$

где δ — весьма неопределенный «коэфициент зажорности».

Существуют также *гидрометеорологические* методы определения коэфициента K, вводящие в рассмотрение накопление в течение зимнего периода и ход температур воздуха и фазы ледовых явлений.

В общем ни один из существующих методов не дает решения, пригодного для всех случаев, и к каждому потоку приходится подходить индивидуально, на основе детального анализа материалов.

Рассмотренные способы установления зимних расходов касались главным образом интерполяции их в пределах периода измерений. При желании получить на основании длительного ряда водомерных наблюдений расходы за годы, когда таковые не измерялись, приходится итти приближенными путями, пользуясь средними кривыми и коэфициентами. С этой целью, например, Волховским строительством была построена кривая зимних расходов по измерениям 1910—1924 гг. и распространена на период с 1881 по 1924 г.

Так как измеренные расходы давали весьма большое рассеяние точек при сопоставлении их с уровнями на ближайшем постоянном Гостинопольском посту вследствие перемежающегося подпора от донного льда и зажоров, то расходы были отнесены к вышележащему посту у ст. Волхово, где эти явления почти не наблюдались (расстояние между этими постами около 100 *км*).[1]

На рис. 249 показано расположение точек расходов в том и другом случае. По средней кривой расходов для ст. Волхово и были подсчитаны расходы за весь период 1881—1924 гг.

Остается упомянуть еще об одном сравнительно редко применяемом способе подсчета ежедневных расходов (за период измерений) без помощи кривой расходов одинаково применимом как для неустойчивого русла, так и для переменного уклона и зимнего периода. Это — метод *линий равных расходов* (рис. 250). На графике колебаний уровня по ординатам — рабочим горизонтам — отмечаются точки (кружки), каждой из которых приписывается величина измеренного расхода. По этим точкам проводятся линии равных расходов так же, как при составлении по высотным отметкам плана в горизонталях. Тогда путем простой

[1] В зимнее время изменение расхода на этой длине невелико, так как Волхов питается главным образом озером Ильмень.

интерполяции нетрудно найти расходы по уровням на каждый день. Негоризонтальность линий равных расходов отражает изменчивость всех гидравлических условий движения потока в совокупности. Чем больше сделано измерений, тем более подробно может быть получена эта картина и точнее найдены ежедневные расходы.

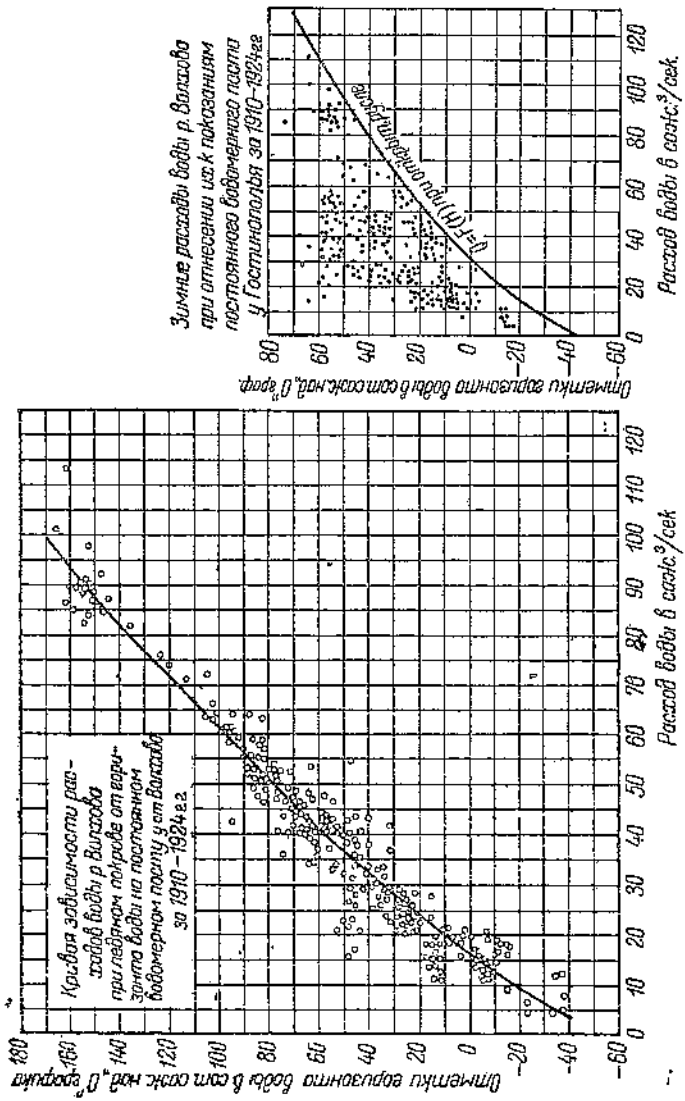


Рис. 249. Средняя зимняя кривая расходов р. Волхова.

§ 65. Пользование кривой расходов и обработка данных по ежедневным расходам. Как следует из предыдущих параграфов, расходы на каждый день могут находиться из кривой расходов 1) непосредственно или 2) путем введения тех или иных поправок, рассмотренных выше.

Нахождение величин расходов производится или по кривой — графически, или из соответствующей таблицы. В первом случае

кривая должна быть тщательно вычерчена в масштабе, допускающем отсчет расходов с необходимой точностью (обычно три значащих цифры).

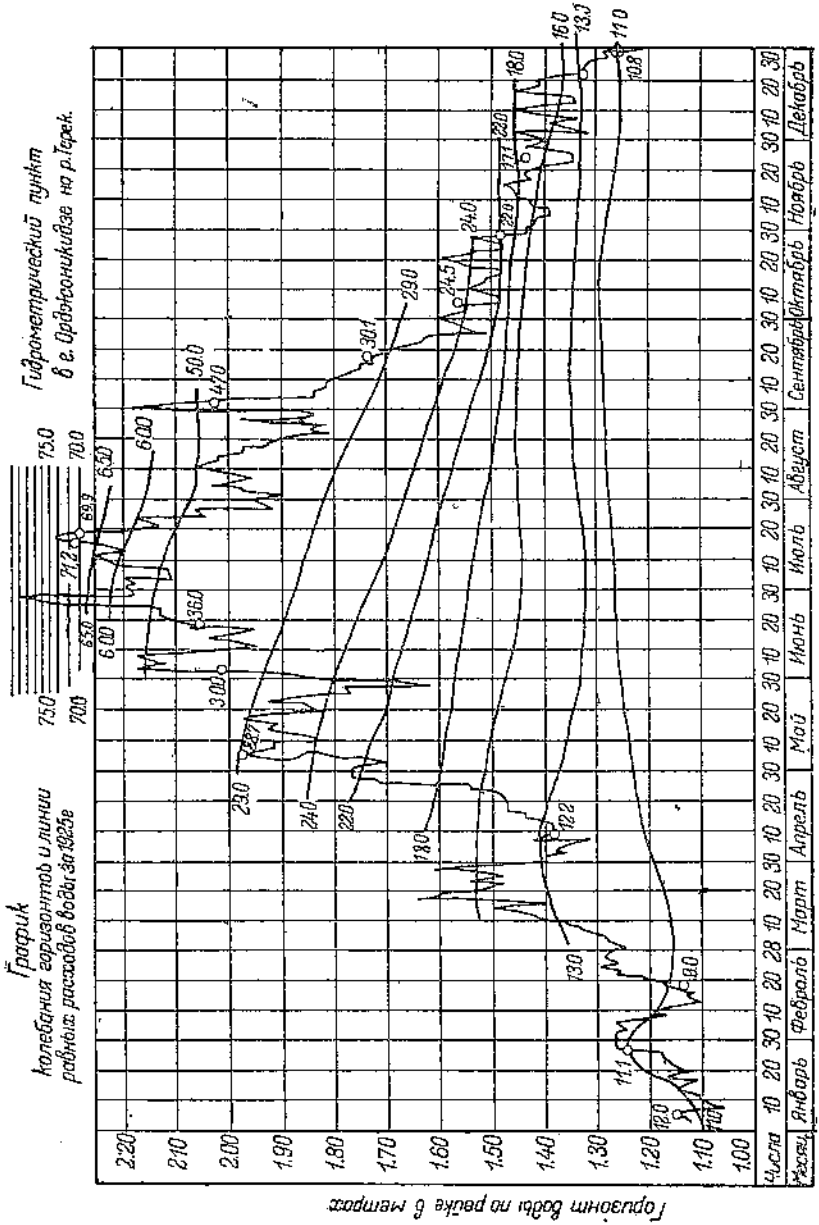


Рис. 250. Линии равных расходов.

Таблица составляется или на основании такой кривой или по ее уравнению. В ней выписываются уровни (или другие величины —

например средние, максимальные глубины, смотря по типу кривой) в порядке возрастания или убывания через каждый сантиметр и соответствующие каждому уровню значения расходов. Иногда уровни берутся через определенные интервалы (2, 5, 10 *см*) и расходы для промежуточных уровней вычисляются путем интерполяции. При этом надо иметь в виду, что для больших интервалов и при большой кривизне кривой прямолинейная интерполяция может привести к ощутительным ошибкам, так как вычисленные таким образом расходы отвечают точкам не на кривой, а на хорде (рис. 251), и будут несколько преувеличенными.

Расходы, превосходящие измеренные и меньше таковых, приходится брать путем *экстраполяции*. С этой целью кривая должна быть продолжена до наивысшего уровня вверх и до наинизшего вниз, что, как уже отмечалось, связано с известным произволом, тем бо́льшим, чем дальше приходится ее продолжать. Продолжение кривой вниз надо сообразовать с уровнем нулевого расхода, о чем уже была речь выше. Некоторые методы построения кривых связаны с выполнением этого условия, другие с ним не считаются. Так, параболы вида $Q = a + bH + cH^2 + \ldots$ могут не пересекать оси H (рис. 252), а экстраполяция этого уравнения вниз может приводить к увеличению расходов с уменьшением высоты уровня (для уровней ниже вершины параболы). Очевидно, такие кривые нельзя экстраполировать по одному уравнению, и нижняя часть их подлежит исправлению.

Экстраполяция вверх не приводит к таким несообразностям, но и тут важно по возможности правильно наметить кривую, чтобы не очень преувеличить или преуменьшить высокие расходы, так как их величина отзывается на размерах гидротехнических сооружений и водохозяйственных расчетах. Правильное разрешение этой задачи весьма затруднительно и не всегда выполнимо. Если для высоких расходов имеются данные о коэфициенте шероховатости русла и продольном уклоне, то кривая продолжается в согласии с теоретическим выражением для расхода $Q = \omega C \sqrt{RI}$. Если этих данных нет, то кривую приходится продолжать по уравнению или опираясь на продолжение кривых $\omega = \varphi(H)$ и $V = f(H)$, принимая во внимание разные соображения о предельных возможных горизонтах и расходах.[1]

Для кривых обычного типа $Q = F(H)$ по средним суточным уровням находятся средние суточные расходы. И здесь надо иметь в виду, что при резких колебаниях уровня в течение суток расход по кривой может оказаться преуменьшенным по ранее указанной причине (рис. 251). Правильнее сначала найти расходы для каждого отдельного наблюдения, а затем из них определить средний расход за сутки.

Среднесуточные расходы на каждый день сводятся в *годовые таблицы*, одна из форм которых приведена в приложении 8. При введении в расходы поправок таблица несколько усложняется. Напри-

[1] Например, определяя максимальные расходы косвенными методами гидрологии.

мер, для подсчета расходов по методу *Стаута* необходимо вычислять еще исправленные уровни.

По данным годовой таблицы строится график расходов, иногда называемый *гидрографом*. На рис. 253 график расходов р. Сыр-Дарьи у ст. Запорожской за 1925 гидрологический год (по данным приложения 8) совмещен с графиком колебаний уровня и, как видно, повторяет его очертания. На рис. 254 показан график расходов р. Неман (сел. Бирштаны, 1927 г.), где зимние расходы, взятые по летней кривой (пунктирная линия), исправлены по способу *Колупайло*.

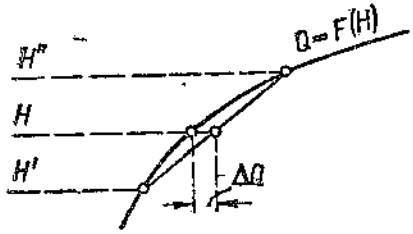


Рис. 251. Интерполяция кривой расходов.

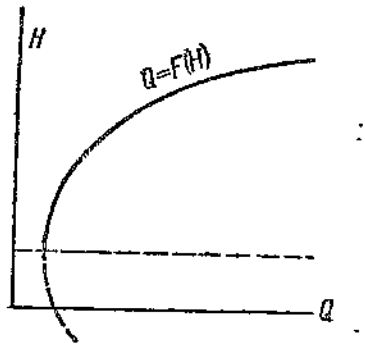


Рис. 252. Кривая расходов в виде параболы.

В таблице ежедневных расходов так же, как и при обработке годовой таблицы уровней (гл. I), подсчитываются средние расходы по месяцам и за год (в приложении 8 также за вегетационный и невегетационный периоды) и выписываются величины минимальных и максимальных расходов за те же периоды.

Еще раз отметим, что здесь является уже совершенно недопустимым определение средних за периоды (месячных, годовых) расходов по средним уровням[1], так как ошибка, благодаря большой амплитуде колебания уровней и кривизне кривой расходов, становится весьма значительной.

Например, по таблице приложения 8:

	Средний уровень	Средний расход	Расход по среднему уровню
за май . . .	171	722	681
„ август . .	122	486	479
„ год . . .	125	519	490

По данным одной годовой таблицы или за несколько лет часто производится еще статистическая обработка расходов совершенно так же, как уже рассмотрено в гл. I для уровней. Строятся кривые частоты и продолжительности расходов, определяются значения медианных и квадрильянных расходов, а также другие характерные расходы (низкий промышленный, 9-месячный, 6-месячный и т. п.).

На рис. 255 показаны кривые частоты и продолжительности расходов р. Сыр-Дарьи у ст. Запорожской за период 1898—1925 гг.

[1] Такие приемы обработки иногда встречаются.

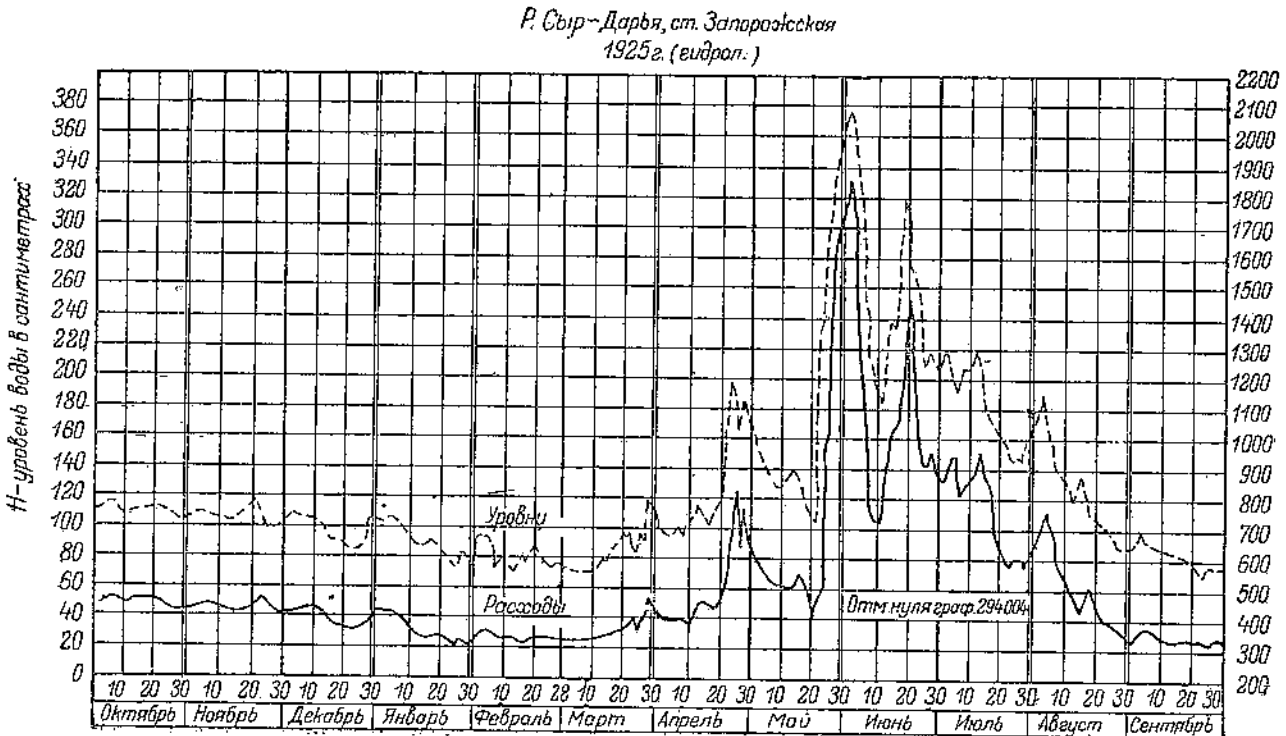


Рис. 253. Гидрограф.

Полученные в результате составления годовых таблиц расходы — средние суточные, месячные, годовые — представляют для этих же периодов средний *секундный сток*, и от них нетрудно перейти к объемам воды, протекшим через створное сечение потока, т. е. к стоку любые периоды.

Так, суточный сток получится умножением среднего суточного расхода на число секунд в сутках, равное $24 \times 60 \times 60 = 86\,400$,

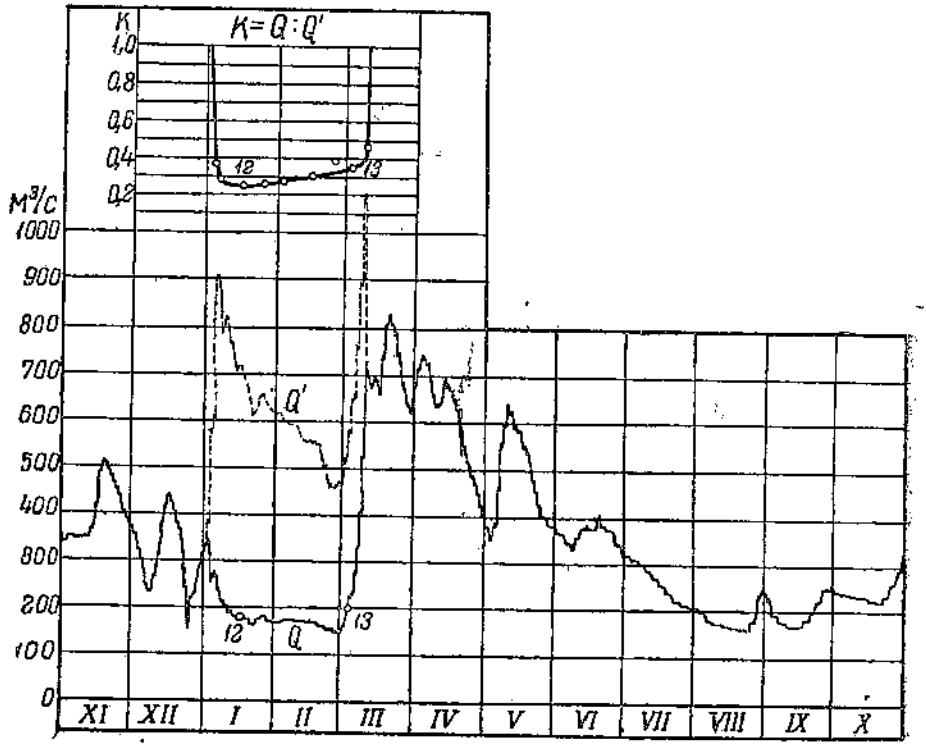


Рис. 254. Гидрограф р. Неман у сел. Вирштаны за 1927 год.

месячный сток получится умножением среднего месячного расхода на ту же величину и еще на число дней в месяце, т. е.

для месяца с 31 днем — на $31 \times 86\,400 = 2{,}68 \cdot 10^6$,
„ „ „ 30 днями — „ $30 \times 86\,400 = 2{,}59 \cdot 10^6$,
„ февраля „ 29 „ — „ $29 \times 86\,400 = 2{,}51 \cdot 10^6$,
„ „ „ 28 „ — „ $28 \times 86\,400 = 2{,}42 \cdot 10^6$.

Годовой сток равен среднему за год расходу, умноженному на число секунд в году, т. е.

при 365 днях в году — на $365 \times 86\,400 = 31{,}54 \cdot 10^6$,
„ 366 „ „ „ — „ $366 \times 86\,400 = 31{,}62 \cdot 10^6$.

Те же величины стока по периодам могут быть определены путем суммирования среднесуточных расходов Q и умножения суммы на

коэфициент 86 400, так как сток S равен

$$S = \sum (Q \cdot 86\,400) = 86\,400 \sum Q. \qquad (187)$$

Это выражение может быть представлено и в таком виде:

$$S = 86\,400n\left(\frac{\sum Q}{n}\right) = (86\,400n) \cdot Q_{ср}, \qquad (188)$$

где n — число дней в периоде, а $Q_{ср}$ — средний для того же периода расход. Значения коэфициентов ($86\,400\ n$) для месяцев и года были только что приведены.

Таким же образом нетрудно вычислить сток и по другим любым периодам, например по пятидневкам, декадам, полумесяцам и т. д.

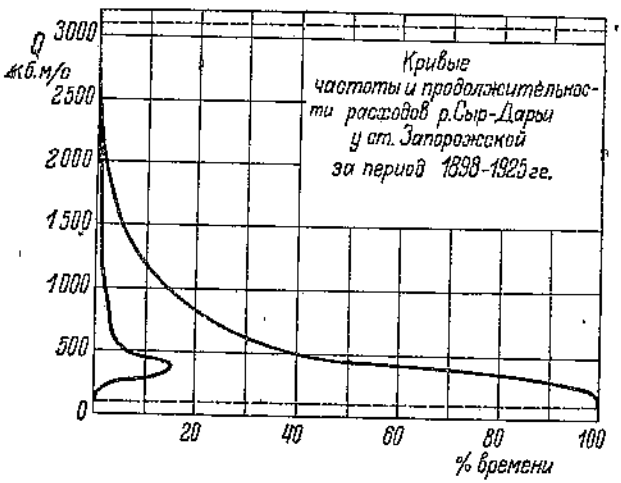


Рис. 255. Кривые частоты и продолжительности расходов.

Имея дело с графиками расходов, можно найти площадь, заключенную между линией колебания расходов и осью абсцисс ($Q = 0$) в пределах рассматриваемого периода. Она будет выражаться в единицах расхода ($м^3/сек.$), умноженных на единицу времени (сутки), и представлять собой величину $\int Q dt$, или при $dt = 1$ (сутки) величину $\Sigma\ Q$. Деля ее на величину периода ($ndt = n$), мы получаем величину среднего расхода $Q_{ср}$ (высоту прямоугольника равной площади), а умножая на 86400 — сток (187).

Теоретически график в виде ступенчатой линии (рис. 254) более соответствует средним суточным расходам, с которыми мы имеем дело, чем график из прямых линий, соединяющих точки расходов (рис. 253), однако практически при определении площадей (планиметром) это обстоятельство не играет существенной роли, если чертеж выполнен достаточно тщательно.

§ 66. Интегральная кривая стока. Для решения вопросов, связанных с регулированием стока путем устройства водохранилищ, чрезвычайно удобной является обработка данных по расходам в виде так называемой *суммарной* или *интегральной кривой* стока. Абсциссами этой кривой служит время, а ординатами — суммарный сток, считая от начала периода, для которого имеются данные о расходах. Таким образом, любая ордината кривой дает количество воды, протекшей в данном пункте реки от начального до данного момента, а разность двух ординат — сток за отрезок времени, ими ограниченный.

В зависимости от длины периода и желательной степени дета-

лизации кривой, сток вычисляется за более или менее дробные элементы времени — посуточно, по пятидневиям, декадам и т. п.

Сток лучше подсчитывать по формуле (187), во избежание накопления ошибок при пользовании формулой (188), где округленный средний расход, полученный от деления суммы расходов на число дней, умножается снова на то же число дней. С этой целью полезно при вычислении средних расходов вводить в таблицу также величины ΣQ, подсчет которых для вывода средних все равно необходим.

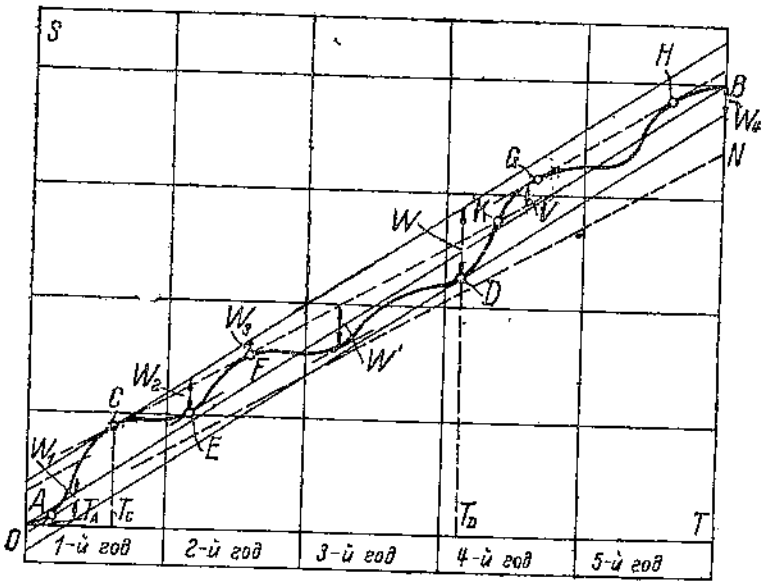


Рис. 256. Интегральная кривая стока.

Интегральная кривая стока в прямоугольных координатах получает вид, примерно показанный на рис. 256. Характерной ее особенностью, как это следует из сущности дела, является непрерывное нарастание ординат по ходу времени. Только если бы расход за некоторый элемент времени равнялся нулю, кривая имела бы горизонтальный участок. Чем больше величина расхода, тем быстрее нарастают ординаты и круче подъем кривой. Поэтому периодам больших расходов в реке (например весной) отвечают крутые участки кривой, периодам с малыми расходами — пологие, и ежегодный переход от половодья к межени и низким зимним расходам выражается чередованием своего рода волн различной амплитуды и очертания.

Взяв две точки A и B на кривой (рис. 257), будем иметь за время $T_B - T_A = \Delta T$ сток $S_B - S_A = \Delta S$ и средний расход:

$$Q_{ср} = \frac{\Delta S}{\Delta T} = \operatorname{tg} \alpha. \qquad (189)$$

Этот равномерный расход давал бы нарастание стока по прямой линии AB в итоге такое же, какое получается по кривой при переменных расходах.

С приближением точки B к A на бесконечно близкое расстояние dT, секущая AB обратится в касательную к кривой в точке A, тангенс угла наклона которой к горизонтальной оси будет равен уже не среднему расходу, а расходу в момент T_A:

$$Q_A = \frac{dS}{dT} = \operatorname{tg}\beta. \qquad (190)$$

Таким образом, всякому расходу на нашей кривой отвечает определенный угол или направление прямых линий, и масштаб расходов мог бы быть изображен в виде пучка прямых линий разного направления, из которых каждое отвечает определенной величине расхода. Его нетрудно построить по катетам прямоугольного треугольника, взяв за горизонтальный катет (ΔT) некоторую постоянную величину

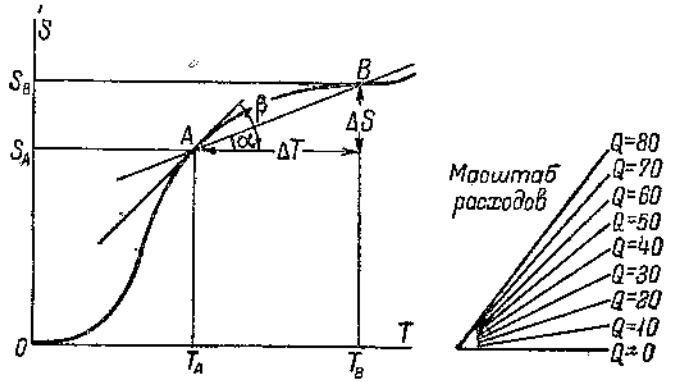


Рис. 257. Определение расходов по интегральной кривой стока.

и вычисляя для заданных значений Q соответствующий сток ΔS (вертикальный катет).

На кривой рис. 256 прямая OB есть линия равномерного среднего расхода за весь период. Очевидно, это есть предельная величина расхода, который можно *зарегулировать* путем устройства водохранилища. Проведя две объемлющие всю кривую касательные линии среднего расхода, мы и найдем потребную емкость водохранилища как расстояние между ними по вертикали W.

Действительно, от момента O до T_A расходы в реке меньше $Q_{ср}$, и чтобы обеспечить в этот период расход $Q_{ср}$ надо было бы иметь в водохранилище к моменту O запас воды, равный W_1, который к моменту T_A был бы израсходован. Далее до момента T_C естественные расходы больше $Q_{ср}$ (кривая поднимается круче прямой OB) и водохранилище наполняется. Начиная с момента T_C, идет опять опорожнение водохранилища до точки E (израсходован из водохранилища объем W_2), затем наполнение до точки F (до запаса, имевшегося в момент T_C, нехватает объема W_3) и т. д. Наибольшая нехватка будет иметь место в момент T_D (объем W), дальше водохранилище опять то наполняется (не достигая однако объема в момент T_C), то опорожняется.

Таким образом, если располагать полезным объемом водохранилища W и некоторым начальным запасом воды в нем W_1, то можно поддержать на протяжении всего периода постоянный расход $Q_{ср}$. В момент T водохранилище будет наполнено, в момент T_D опорожнено и должно вмещать полезный запас W. К концу периода (B) в нем останется неизрасходованный объем воды W_4.

Имея кривую зависимости объема водохранилища от высоты уровня воды в нем, нетрудно по величинам W_i для каждого момента времени найти соответствующие значения понижений уровня по отношению к наивысшему, когда водохранилище наполнено (или повышения уровней от наинизшего), и по ним построить график колебаний уровня в водохранилище.

Если регулированием обеспечивается расход меньше среднего, то часть воды в некоторые периоды должна быть сброшена,[1] а водохранилище потребуется меньшего объема. Так, для регулированного

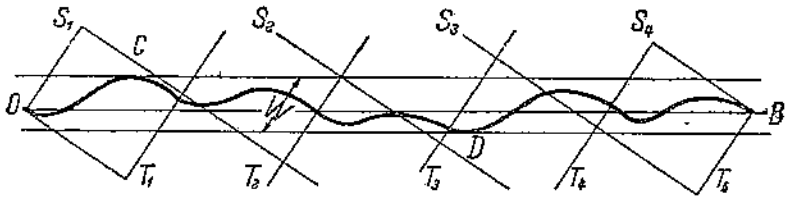


Рис. 258. Интегральная кривая стока, расположенная горизонтально.

расхода Q', определяемого наклоном пунктирных линий параллельных ON (наклон меньше, чем для линий $Q_{ср}$), верхние касательные пройдут через точку немного правее C, F, G, H, пересекая на своем продолжении кривую в точке K. Емкость водохранилища W' найдется подобно предыдущему случаю — как наибольшая нехватка. Точка K будет отвечать началу сброса; в этот момент водохранилище наполнено, и в реку надо выпускать естественный расход до тех пор, пока он превышает регулированный расход, т. е. до точки G, когда водохранилище снова начинает опоражниваться. В начальный период нужно также иметь некоторый запас воды в водохранилище, по истощении которого (около точки A) сброс начнется при наполненном водохранилище (не доходя точки C). Объем V (между K и G) есть ненужный объем сброшенной воды.

Неудобство построения интегральной кривой стока изложенным способом заключается в том, что при крупном масштабе и многолетнем периоде кривая далеко вытягивается по диагонали чертежа и дает вытянутые волны небольшой амплитуды, понижающие точность графических построений.

Чтобы избежать первого неудобства, можно, сохраняя прямоугольную сетку, выделить из чертежа (рис. 256) только полосу, заключающую кривую, расположив ее горизонтально (рис. 258). Для того же, чтобы представить в более резкой форме волны кривой,

[1] Пропущена через сооружения без задержки в водохранилище.

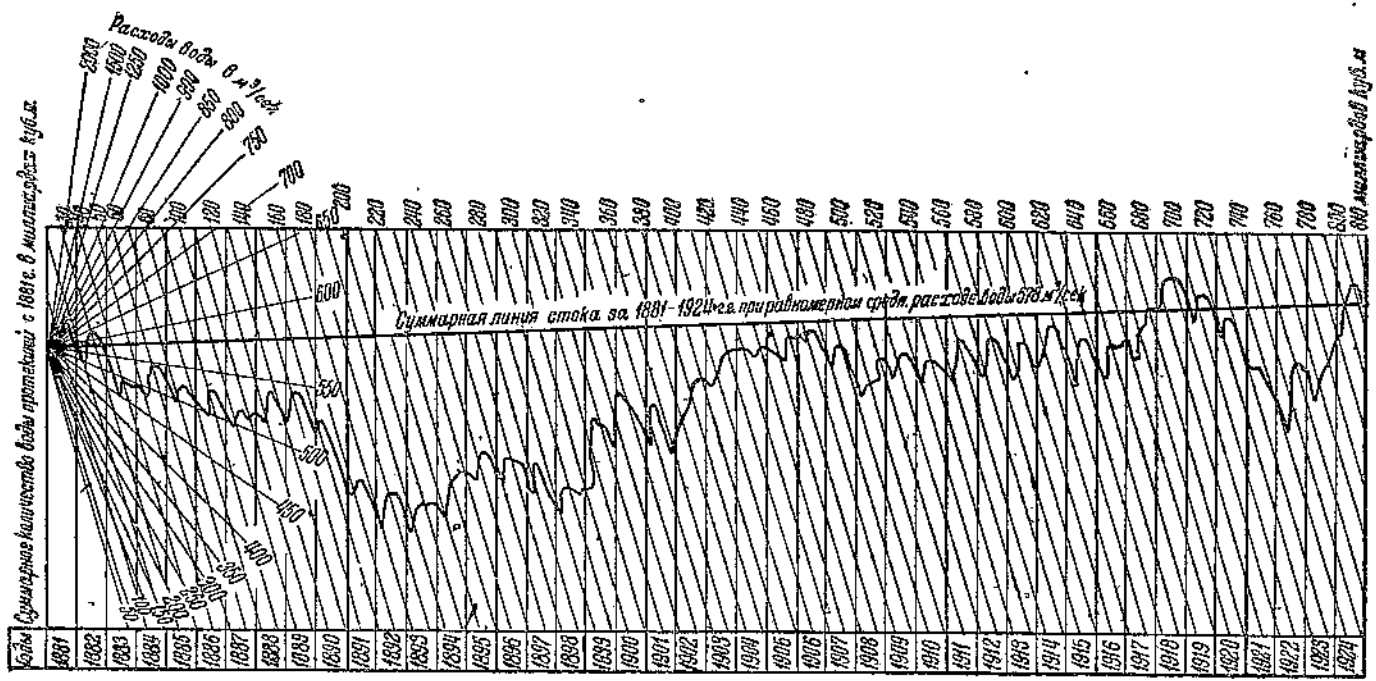


Рис. 259. Интегральная кривая стока р. Волхова за 44 года в косоугольных координатах.

удобно перейти от прямоугольных координат к *косоугольным*. Кривая, построенная в косоугольных координатах, показана на рис. 259.

Координатная сетка для интегральной кривой стока в косоугольных координатах может устанавливаться следующим образом (рис. 260). Приняв для линии среднего расхода горизонтальное направление и сообразуясь с величиной полного периода, устанавливаем масштаб времени по горизонтали (линии T_1, T_2, T_3,...) и начальную (O) и конечную (B) точки кривой. На отрезке OB размечаем также масштаб стока (деления S_1, S_2, S_3,...), исходя из величины полного суммарного стока и длины отрезка OB.

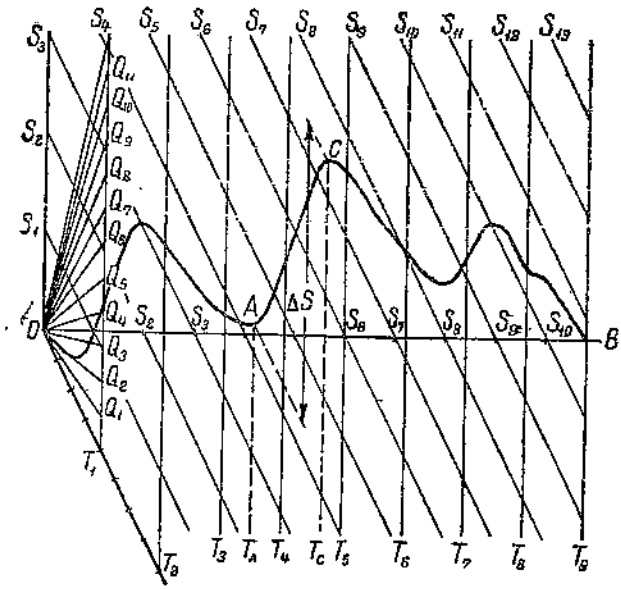


Рис. 260. Построение интегральной кривой в косоугольных координатах.

Масштаб стока по вертикальной оси (S) выбираем такой, чтобы общая амплитуда кривой по вертикали (отрезок W на рис. 256) была достаточной для графических операций с кривой и уместилась бы на чертеже. Проводя через соответствующие деления масштаба стока на оси S и на горизонтальной линии OB ряд параллельных наклонных прямых, находим направление оси времени T и масштаб времени по этой оси.

Можно приписать горизонтальную линию OB и не среднему расходу, а некоторому другому, например близкому к нему или округленному, чтобы получить удобный масштаб стока по горизонтали. Тогда линия среднего расхода, а с ней и вся кривая расположатся несколько наклонно, как на рис. 259.

Для нанесения на сетку точек кривой по координатам T и S удобно заготовить приставной бумажный масштабик, делящий достаточно мелко величину стока по вертикали между соседними наклонными прямыми.

Установление координатной сетки описанным образом неудобно в том отношении, что для выяснения амплитуды W надо итти ощупью или строить предварительную интегральную кривую в прямоугольных координатах. Избежать этого можно, если строить кривую не по значениям суммарных стоков S, как это делалось до сих пор, а по отклонениям $S - S_0$ (рис. 260) точек кривой от горизонтальной линии.

Для этого придется вычислить (дополнительно к таблице основных значений T и S) на каждый момент времени суммарные стоки S_0 при постоянном среднем расходе и соответствующие разности S и S_0. Откладывая последние, если они положительны, вверх, а если отрицательны — вниз от горизонтальной прямой, получим ту же интегральную кривую, причем амплитуда ее W может быть выяснена заранее как сумма наибольшего положительного и отрицательного отклонений из столбца $S - S_0$.

Направление наклонных прямых S_1, S_2, S_2, ... найдем по предыдущему, разбив масштаб стока по горизонтали или, например, отложив вниз от линии OB величину S_0 для некоторого момента.

И в этом способе построения можно принять за горизонтальную линию расход, несколько отличный от среднего, вычисляя по нему величины S_0' и $(S - S_0')$, вследствие чего опять вся кривая и линия среднего расхода расположатся наклонно.

Для получения масштаба расходов вычисляем за некоторый период, например OT_1, величины стока при расходах Q_1, Q_2, Q_3 и т. д. и откладываем их вверх от оси T, проводя линии расходов OQ_1, OQ_2, OQ_3 и т. д.

Приращение стока за период времени, ограниченный моментами T_A и T_C, находится графически, как показано на рис. 260.

Для интегральной кривой в косоугольных координатах уже не имеют места равенства (189) и (190), и угол, образуемый секущей или касательной с осью T, может быть не только острым, но и тупым. В остальном графические построения и определение потребной емкости водохранилища производятся так же, как уже было рассмотрено выше.

ГЛАВА V

УЧЕТ НАНОСОВ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

§ 67. Общие сведения о наносах. Передвижение водой твердых веществ или *наносов*, представляющих продукты размыва русла и берегов, находится в тесной связи с механизмом и характером движения потока. Сложные законы последнего еще далеко не выяснены, поэтому и в отношении движения наносов в науке не существует полной ясности и единства взглядов. Наносы, как результат активной деятельности воды на земном шаре (эрозии), изучаются геологией (их состав, строение и пр.), однако, будучи неразрывно связаны с движением воды и характеризуя таковое, наносы составляют и предмет изучения гидрологии. В частности, наблюдения над наносами и количественный учет их в потоках и водоемах входят в задачи гидрометрии.

Кроме расхода воды, о котором говорилось до сих пор, поток характеризуется *твердым расходом*, представляющим количество наносов, проходящее в секунду через поперечное сечение, и выражаемым в весовых или объемных единицах. Твердый расход составляется из наносов: 1) *взвешенных*, т. е. поднимаемых водою, 2) *донных*, перекатываемых и влекомых по дну, и 3) *растворенных* в воде.

Часть наносов может переходить при движении из одного состояния в другое: из влечения по дну — во взвешенное состояние и обратно (прерывное взвешивание), и частично растворяться.

Наносы взвешенные и донные играют особенно большую роль в речной гидротехнике, так как с ним связаны *деформации русла* — явления размыва и отложения наносов, и занесение водохранилищ. Возведение всякого рода гидротехнических сооружений нарушает естественный режим вод и наносов, и необходимо предугадывать их действие на этот режим, так же как и обратно — действие наносов на сооружения, что приводит к необходимости изучения наносов и количественного учета их.

Насколько грандиозна незаметная, но непрерывная работа рек по перенесению взвешенных и растворенных наносов, видно, например, из того, что во время паводка за одни сутки р. Сыр-Дарья (у ст. Зимороженской, 1910 г.) проносила около 700 000 $м^3$ взвешенных наносов и 53 000 $т$ растворенных, р. Аму-Дарья (у ст. Керкинской) соответственно 1 300 000 $м^3$ и 68 000 $т$. За год (1911) р. Сыр-Дарья пронесла взвешенных наносов около 20 млн. $м^3$ и растворенных 6 млн. $т$, р. Аму-Дарья — 250 млн. $м^3$ и 21 млн. $т$.

В настоящее время гидрометрия располагает сравнительно удовлетворительными методами учета взвешенных и растворенных наносов и весьма грубыми и несовершенными приемами для наблюдений над донными наносами.

Передвижение взвешенных и донных наносов непосредственно связано с двумя основными свойствами турбулентного потока: наличием пульсации скоростей, обусловливающим существование переменных поперечных составляющих скоростей, и конечной донной скоростью. В отношении растворенных солей, которые поступают в поток с грунтовыми водами и отчасти благодаря выщелачиванию водой грунтов русла, турбулентность движения приводит лишь к их перемешиванию, в результате чего получается равномерное распределение солей во всем живом сечении (см. § 56, определение расходов методами смешения).

Основными характеристиками взвешенных и донных наносов являются *крупность* и *удельный вес* частиц. Для наносов взвешенных оба эти свойства, а также *форма* частиц удобно учитываются суммарно так называемым *гидравлическим размером* или *гидравлической крупностью* частиц, под которой разумеется равномерная скорость падения частиц в стоячей пресной воде при температуре 15° Ц. Тяжелая частица в турбулентном потоке будет удерживаться во взвешенном состоянии или подниматься, если направленная в данный момент вверх вертикальная составляющая скорости течения равна ее гидравлическому размеру или более его.

Так как вертикальные составляющие скоростей (как и пульсация) уменьшаются от дна к поверхности, то в общем мы наблюдаем взвешивание более крупных и тяжелых частиц в придонных слоях и уменьшение их размеров к поверхности. Если наносы более или менее однородны по размерам и вертикальные составляющие скоростей у поверхности достаточны для взвешивания частиц наибольшей крупности, то во всей толще потока могут встречаться частицы одинаковой крупности.

Общее количество и вес взвешенных частиц на разных высотах над дном не находятся в определенной зависимости от скорости течения. Обычно количество взвешенных наносов увеличивается от поверхности к дну, но часто наблюдается и «жильное» распределение наносов в живом сечении, причем главная их масса движется как бы отдельными жилами внутри потока, в связи с местными размывами, конфигурацией русла и распределением скоростей. Весовое количество взвешенных наносов в единице объема воды a называется *относительной мутностью* или *насыщением потока* наносами. Оно может выражаться в килограммах, граммах, миллиграммах на куб. метр или литр воды, причем очевидно, что

$$a\ кг/м^3 = a\ г/л = a\ мг/см^3.$$

Расход взвешенных наносов, т. е. весовое количество их, проносимое в секунду через живое сечение потока, есть его *абсолютная мутность* G. Средняя для всего сечения относительная мутность потока равна:

$$a_{ср} = \frac{G}{Q}, \qquad (191)$$

где Q есть расход воды потока. Относительная мутность может также выражаться как объем наносов (уплотнившегося осадка) в единице объема воды, например в *см³/л*, или в процентах по весу или по объему.

Совершенно аналогично с понятием мутности можно говорить о *солености* воды — относительной и абсолютной.

Для определения относительной мутности и солености в разных точках потока особыми приборами — *батометрами*, о которых уже упоминалось, берутся *пробы* воды, подвергающиеся затем анализу. На основании данных анализа могут быть построены эпюры распределения мутности по вертикалям (рис. 261), а также изолинии мутностей в живом сечении (рис. 262).

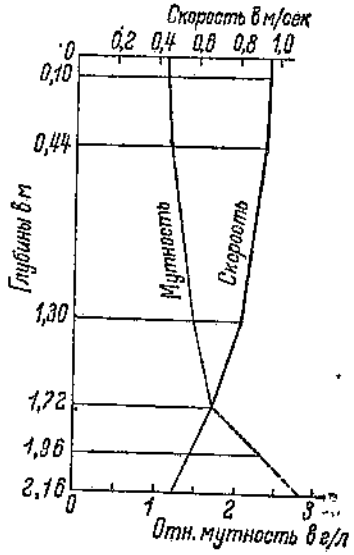


Рис. 261. Распределение мутности по вертикали.

Для определения абсолютной мутности работы по взятию проб должны, очевидно, сочетаться с измерением скоростей и определением расхода воды потока. Те же или другие пробы воды, по выделении из них твердых частиц, могут быть использованы для выяснения количества и состава растворенных солей, а также исследования в некоторых отношениях самой воды.

Законы движения донных наносов весьма мало выяснены. Нередко донные наносы движутся продольными полосами, ширина и

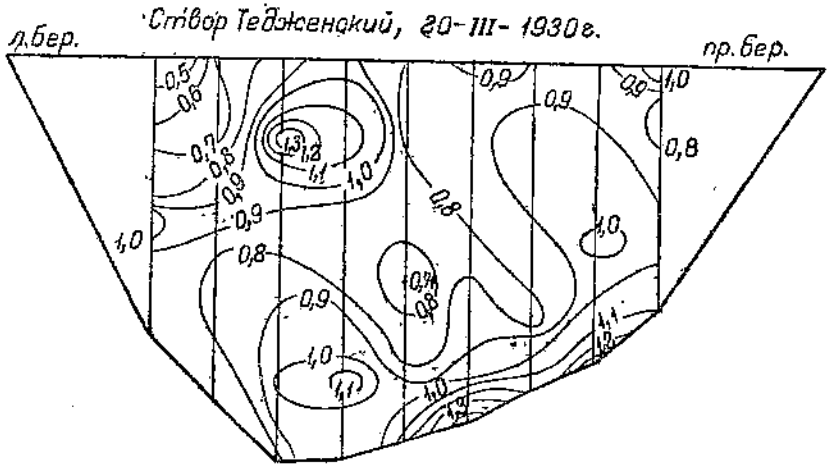


Рис. 262. Изолинии мутности в поперечном сечении р. Теджен.

мощность которых не могут быть поставлены в определенную связь с гидравлическими элементами потока и крупностью наносов. Непосредственные наблюдения над движением донных наносов также представляют весьма трудную задачу, а приборы и приемы, служа-

щие для этой цели, как увидим ниже, чрезвычайно грубы и несовершенны.

О перемещениях взвешенных и донных наносов можно судить, не только наблюдая их движение, но и исследуя их отложения и размыв берегов и русла, для чего особыми приборами берутся пробы грунтов дна или производятся периодические промеры, позволяющие учитывать деформации русла.

§ 68. Приборы для наблюдения над взвешенными и растворенными наносами. Батометры этого рода можно разделить на два основных класса: 1) батометры мгновенного наполнения, 2) батометры длительного наполнения.

И те и другие должны иметь конструкцию, позволяющую брать пробу воды в определенной точке, по возможности менее нарушая естественные условия движения потока.

Наиболее употребительным прибором первого класса является батометр *Жуковского* (рис. 263), представляющий металлический цилиндр диаметром 8—10 *см* и высотой 20—25 *см*. Прибор имеет две крышки с резиновыми прокладками, захлопывающиеся под действием пружин при дергании шнура, отодвигающего собачки. Батометр навинчивается на конец штанги и опускается на требуемую глубину с открытыми крышками так, чтобы ось цилиндра расположилась по направлению течения. При дергании шнура крышки захлопываются, затем прибор вынимается из воды и его содержимое сразу выливается в воронку, вставленную в бутыль. Для определения мутности употребляется или вся полученная проба воды или часть ее. В последнем случае бутыль хорошенько взбалтывается и из нее наполняется специальная бутылка для анализа, которая затем закупоривается и снабжается этикеткой с обозначением времени и места взятия пробы.

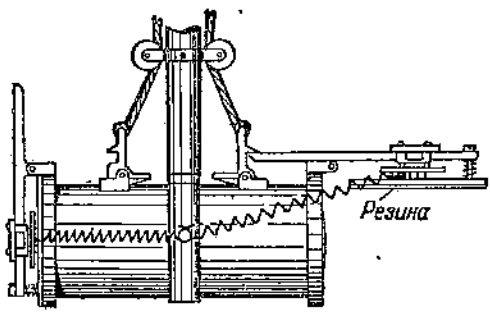


Рис. 263. Батометр Жуковского.

При более точных работах воде в бутыли дают отстояться минут 15—20, потом при помощи резинового сифона удаляют верхнюю осветленную воду, измеряя количество слитой воды мензуркой, а тщательно взболтанный остаток переливают в бутылку для анализа. Избежать двойного переливания воды можно, применяя батометр меньшего размера, — такого, чтобы вся вода поместилась в обыкновенную бутылку.

На рис. 264 изображен батометр той же системы, но соединенный с вертушкой и спускаемый на тросе. Этот прибор сконструирован *Жуковским* для работ Горьковской инженерно-гидрологической станции на р. Волге, где глубины достигают 20—25 *м* и более. Сначала определяется скорость течения вертушкой, снабженной электрической сигнализацией, затем приводится в действие спусковой

механизм батометра и берется проба воды. После этого прибор извлекается из воды и от него отделяется батометр, содержимое которого выливается в воронку.

Батометры мгновенного наполнения не учитывают пульсации мутности. В батометры *длительного наполнения* вода натекает постепенно, и прибор «собирает» струю длиной в несколько десятков метров, дающую величину средней мутности в данной точке. В § 38 уже был описан один из приборов этого типа — *батометр-тахиметр*, представляющий резиновый баллон с металлической трубочкой, по которой в него поступает вода. Здесь одновременно с взятием пробы определяется скорость течения, и сам прибор отличается простотой, небольшими размерами и легкостью.

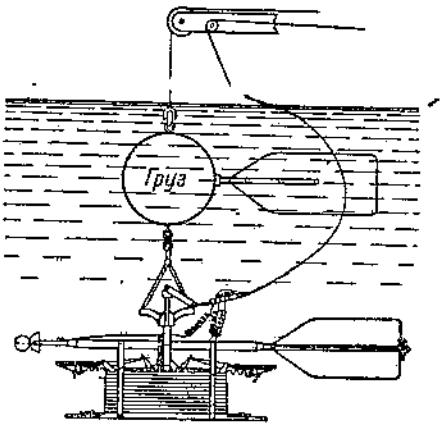


Рис. 264. Батометр Жуковского с вертушкой.

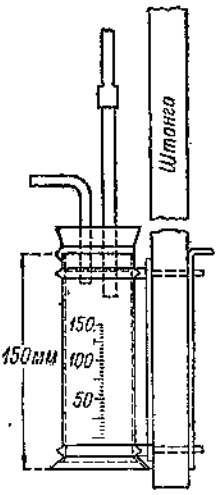


Рис. 265. Батометр-мензурка.

Объем пробы не должен превосходить 900 *см*^{3}, а выливание ее надо делать так, чтобы внутри баллона не оставалось осевших наносов, для чего сначала, держа баллон за конец, дают воде вытекать спокойно, а затем, сплющивая его в продольном направлении, споласкивают несколько раз внутренние стенки еще не вылившейся водой. Крупные наносы этим прибором улавливаются неудовлетворительно.

Для взятия пробы воды определенного, наперед заданного объема, который при некоторых способах учета взвешенных наносов назначается пропорциональным расходу воды потока, может служить *батометр-мензурка* (рис. 265). Прибор представляет стеклянный стакан, градуированный на куб. сантиметры, закрытый сверху резиновой пробкой и прикрепленный к штанге. Через пробку пропущены две стеклянные или металлические трубочки, одна из которых, оканчивающаяся у нижней поверхности пробки, изогнута под прямым углом и направляется навстречу течению. Другая трубка служит для выпуска воздуха, имеет резиновое продолжение достаточной длины вверх и может нижним концом устанавливаться на высоте того деления шкалы, до которого желательно наполнить прибор. Как только вода поднимется в стакане до этой трубки, выпуск воздуха прекратится и вода перестанет поступать в прибор.

К тому же типу относится батометр, изображенный на рис. 266. Объем пробы регулируется выдвиганием пробки *A* с делениями, вода поступает в прибор по трубке *a*, а воздух выходит через отверстие *b* в другой трубке.

Простейший тип батометра представляет *бутылка Мейера* (рис. 267), подвешенная на веревке, которая раздваивается на нижнем конце. Короткий конец веревки прикреплен к пробке бутылки, а более длинный, со слабиной — к ее горлышку. Снизу к бутылке подвешен груз. При дергании веревки бутылка открывается, а находящийся в ней распаренный пробковый шарик, не проходящий через горлышко, закрывает ее изнутри, когда она наполнится водой.

Существует довольно много разнообразных конструкций батометров как для речных так и для озерных и морских исследований. На рис. 268 изображен морской батометр *международного образца*, представляющий цилиндр, вращающийся внутри вертикальной рамы на горизонтальной оси. Цилиндр закрывается двумя крышками, соединенными между собой сильной внутренней пружиной, натягивае-

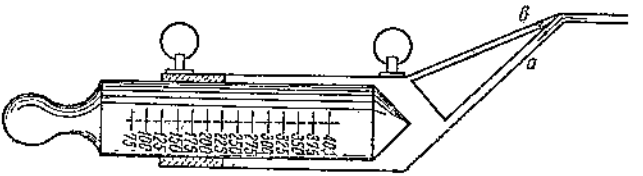


Рис. 266. Батометр длительного наполнения.

мой двумя парами стержней, упирающихся в неподвижные эксцентрические диски на оси вращения. При пуске по линю посыльного груза (см. § 29), освобождающего собачку, цилиндр поворачивается на 180° вокруг горизонтальной оси под действием внутренней пружины, и крышки плотно закрываются. К цилиндру прикреплены две трубки, в которые вставляются опрокидывающиеся термометры (см. § 74), служащие для определения температуры воды на той же глубине, откуда берется проба.



Рис. 267. Бутылка Мейера.

Изучение взвешенных наносов в потоке и точный учет их требуют частого взятия проб в отдельных точках живого сечения и отправки их в лабораторию, которая почти всегда находится в более или менее удаленном центральном пункте. Большое количество проб, их перевозка и производство анализов делают этот способ дорогостоящим, сложным и отнимающим много времени, вследствие чего приходится отказываться от очень частого взятия проб и трудно с надлежащей полнотой поставить количественный учет наносов, а также выяснить их распределение в живом сечении и по длине потока.

Это обстоятельство заставляло искать более совершенных приемов для непосредственного и быстрого учета мутности в отдельных точках потока на месте работ. В 1923 г. *Калитиным* был осуществлен прибор для измерения прозрачности воды, основанный на фотоэлектрическом эффекте и примененный в экспедиции, производившей исследования в Северном Ледовитом океане.

Сущность фотоэлектрического эффекта состоит в испускании поверхностью тел, подверженных действию света, отрицательного электричества, причем испускание последнего происходит особенно интенсивно, если поверхность заряжена отрицательно.

На рис. 269 *А* — металлическая пластинка, соединенная с отрицательным полюсом батареи *В*; *С* — пластинка, соединенная с положительным полюсом через гальванометр *G*. При действии света на пластинку *А* от нее отделяются электроны, устремляющиеся к пластинке *С*, и гальванометр *G* дает отклонение вследствие возникающего в цепи тока. Если между источником света и фотоэлементом *АС* поместить мутную воду, то в зависимости от изменения мутности изменяются интенсивность освещения фотоэлемента и сила возникающего в цепи тока.

Фотоэлектрический батометр *Калитина* (рис. 207) представляет медную трубку диаметром около 15 *см* и длиной около метра. Посередине трубки в ней имеются два расположенных одно против другого отверстия, в одно из которых вставлен объектив *В* (собирательная линза), а в другое простое стекло *D*. Перед объективом в точке *А* помещен электрический источник света (например «точечная» лампа с вольфрамовым шариком, имеющим диаметр до 3 *мм*) так, что его изображение, пройдя поперек трубы и через стекло *D*, падает на фотоэлемент *С*. Источ-

ник света и фотоэлемент защищены от воды покрышками K и L, и от них две пары изолированных проводов выводятся на поверхность. Прибор может опускаться на штанге или (с направляющим его по течению рулем) на тросе и должен быть предварительно проградуирован.

Лабораторные опыты *Калитина* с фотоэлементом при исследовании воды, замутненной прудовым илом, наждаком, глиной и мелом, показали возможность этим путем весьма удовлетворительно определять относительную мутность. Однако речные наносы характеризуются почти всегда неоднородным механическим составом, представляя смесь частиц разной крупности и веса.

Позднейшие опыты *Москвитинова* и *Климовского* показали, что это обстоятельство очень сильно влияет на показания прибора, так что сколько-нибудь точный учет мутности в отдельных точках потока при помощи его становится невозможным. Исследование трех разных смесей наносов, имевших состав, отвечающий действительным условиям, обнаружило, что один и тот же отсчет гальванометра может иметь место при совершенно различных весовых количествах взвешенного материала, отличающихся между собой на 100—200%.

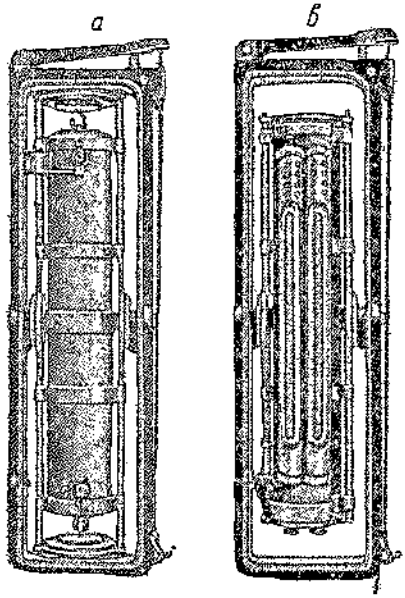


Рис. 268. Морской батометр.

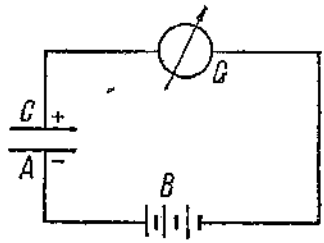


Рис. 269. Схема фотоэлемента.

Таким образом область практического применения фотоэлемента ограничивается пока качественным определением прозрачности воды, а также определением концентрации растворенных солей. В последнем случае изменение прозрачности происходит в ультрафиолетовой части спектра, которая не воспринимается глазом, но в которой фотоэлемент обладает как раз наибольшей чувствительностью.

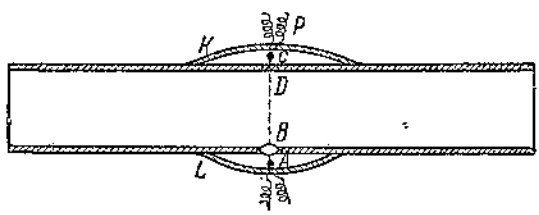


Рис. 270. Схема батометра Калитина.

§ 69. Производство наблюдений над взвешенными и растворенными наносами. Применяются два основных метода при взятии проб воды в потоке:

1) *детальный* метод, когда берутся и анализируются отдельные пробы, взятые в разных точках поперечного сечения, или отдельные пробы для каждого дня;

2) *суммарный* метод, при котором несколько проб сливаются вместе — или для всего поперечного сечения или за известный промежуток времени (неделя, декада, месяц).

Возможны и комбинации обоих методов, например при взятии проб по сечению и сливании их вместе по отдельным вертикалям.

При детальном методе для получения более точных результатов желательно брать возможно бо́льшие пробы воды, — тем бо́льшие, чем меньше мутность потока, однако вследствие неудобств обращения с бо́льшими пробами их объем приходится ограничивать. Для возможности определения механического состава наносов необходимо, чтобы вес наносов в пробе был не менее 0,1 *г*, в связи с чем для рек средней мутности надо брать около 1 *л* воды.

Обычно минимальное количество воды в пробе назначается 500 *см*³. Для анализов на определение только общего количества взвешенных веществ объем проб может быть и меньше (100—250 *см*³).

Взятие проб по сечению детальным методом производится одновременно с определением расхода воды, в тех же точках, где измеряются скорости течения. Число вертикалей, на которых берутся пробы, зависит от ширины реки, характера русла и колебаний мутности. Лучше всего сначала произвести наблюдения над мутностью на всех вертикалях, а затем, сообразуясь с результатом, установить те постоянные вертикали, наблюдениями на которых можно в дальнейшем ограничиться для достаточно полного и точного учета взвешенных наносов.

По инструкции Среднеазиатского опытно-исследовательского института водного хозяйства число вертикалей, на которых берутся пробы, должно быть не меньше пяти для больших рек или неправильных русел и не меньше трех для малых рек и правильных русел. Кроме того, берется по одной пробе у обоих берегов и одна проба ежедневно в постоянной точке для возможности интерполяции мутности по времени. Пробы в сечении берутся во всяком случае не реже четырех раз в год: до весеннего паводка, в начале и в конце паводка и осенью.

Для правильного суждения о мутности потока участок русла с сечением, в котором берутся пробы, должен быть по возможности устойчивым, без значительных местных отложений и размывов.

Пробы желательно брать в тех же пяти точках, в которых производится измерение скоростей основным (пятиточечным) методом, с целью последующего построения эпюр распределения мутности по вертикалям.

Нередко пробы берутся лишь в трех точках вертикали: у поверхности, на половине глубины и у дна, или в точках $0{,}2H$, $0{,}6H$ и $0{,}8H$, и по ним находится средняя мутность на вертикали просто как среднее арифметическое.

Каждая отдельная проба сливается в особую бутылку, закупоривается и снабжается ярлыком, на котором записываются место и время взятия пробы, номер вертикали, глубина взятия пробы и номер бутылки. Последний записывается в соответствующую графу книжки для измерения расхода. Партия бутылок (проб с одного сечения) отсылается в возможно непродолжительный срок в лабораторию вместе с журналом работ (приложение 9).

Детальный способ, часто называемый *весовым*, дает наиболее полную картину распределения мутности в сечении потока, и применение его желательно как для практических целей, так и особенно

при научных исследованиях. Однако ввиду неудобств, связанных с большим количеством проб, учет взвешенных наносов часто ведется суммарным методом, иначе называемым *объемным*. При этом соединение ежедневных проб позволяет судить о средней мутности за некоторый период времени.

И при этом способе пробы необходимо брать на участке реки, свободном от местного загрязнения или размыва, а для того, чтобы обеспечить получение пробы, близкой к средней, характерной для всего живого сечения, лучше выбирать участки с быстрым течением, где имеются благоприятные условия для хорошего перемешивания всей массы воды.

Пробы, взятые с поверхности близ берега, дают обычно преуменьшенную мутность, если русло имеет правильную форму. По исследованиям на р. Мургабе, точка со средней для всего сечения мутностью лежит в расстоянии от берега, равном 0,42 расстояния до стрежня, и на глубине 0,54—0,60 от полной глубины. При возрастании мутности она понижается до $0{,}60H$, при осветлении воды — повышается до $0{,}54H$. Если стрежень приходится посередине потока, то эта точка располагается от берега на расстоянии около 0,2 ширины и примерно на 0,6 глубины.

Разумеется, это правило не может иметь общего значения и является лишь грубо приближенным. Правильнее выяснить сначала детальным методом распределение мутности в сечении для каждого частного случая и затем проверить его. Можно также попытаться путем нескольких определений мутности детальным способом установить зависимость между средней мутностью и мутностью близ берега, где удобнее брать ежедневные пробы.

Ежедневные пробы в одной точке могут браться и по детальному методу — для анализа каждой пробы в отдельности, например батометром *Жуковского* или батометром-тахиметром.

При сливании и смешении ежедневных проб инструкция Среднеазиатского института водного хозяйства рекомендует взятие их объемом 500—750 $см^3$ (в зависимости от мутности реки) батометром *Жуковского* с тем, чтобы объем уплотнившегося осадка был не менее 5 $см^3$ за декаду. Объем проб и период времени, когда берется тот или иной объем, устанавливаются в связи с режимом потока.

По той же инструкции собираемые пробы, начиная с 1-го, 11-го и 21-го числа каждого месяца, сливаются в прокалиброванную бутыль, предварительно чисто вымытую, на дно которой впускаются 20 капель формалина для предохранения воды от загнивания. Декадные суммарные пробы нумеруются, начиная с 1 октября каждого года. Номер суммарной пробы, номер бутыли, время собирания проб и объем собранной воды записываются в журнал учета наносов (приложение 10). Объем записывается: 1) в графе «приблизительный объем пробы», как сумма объемов отдельных ежедневных проб, и 2) в графе «точный объем пробы» — по высоте воды в бутыли и калибровочной таблице.

Бутыль калибруется следующим образом: из миллиметровой бумаги вырезаются две полоски шириной 2 *см* и длиной во всю высоту бутыли. Каждое сантиметровое деление полосок нумеруется числом от нуля вверх, и затем полоски

наклеиваются отвесно на вертикально стоящую бутыль с двух противоположных сторон так, чтобы нуль их совпадал с низом донышка бутыли. На стекле делаются отметки на случай отклейки полосок и обозначается номер бутыли. Затем бутыль ставится на горизонтальную площадку и постепенно наполняется водой; в нее вливают из мензурки по 250 *см*³ воды, записывая каждый раз отсчеты в миллиметрах по двум бумажным шкалам. В калибровочную таблицу вносятся получающиеся при этом объемы воды в бутыли и соответствующие показания шкал: первой и второй и среднее.

Если взятые за декаду пробы не помещаются в одну бутыль, то по наполнении ее их сливают во вторую бутыль и т. д., но *не смешивая* проб двух соседних декад.

Приблизительно через две недели, когда вода в бутыли отстоится и станет прозрачной, она осторожно сливается при помощи сифона. Часть этой воды может быть отлита в бутылку и отправлена в лабораторию для химического анализа и определения количества растворенных солей.

Оставшийся в бутыли осадок или муть взбалтывается и переливается через воронку в *отстойную мензурку* с делениями. Затем бутыль и воронка тщательно споласкиваются слитой чистой водой из той же бутыли, и эта вода с остатками мути выливается в ту же мензурку, которая закупоривается чистой пробкой. Номер мензурки записывается в журнал (приложение 10), и она ставится на целый месяц в спокойное место для окончательного отстаивания и уплотнения осадка.

По истечении этого срока производится отсчет объема осадка с точностью до 0,2—0,5 *см*³, который заносится в тот же журнал. Чистая вода снова удаляется сифоном, осадок высушивается, тщательно собирается на кусок чистой пергаментной бумаги, обращая внимание на то, чтобы в него не попали посторонняя пыль и грязь, и в пакетике отправляется в лабораторию.

Относительная мутность по объему получается делением объема осадка на точный объем суммарной пробы в бутыли, откуда, зная средний расход воды за период взятия пробы, можно вычислить объем пронесенных потоком наносов (приложение 10).

Нередко для большей точности результата объем каждой ежедневной пробы назначается пропорциональным расходу воды, для чего могут служить некоторые из вышеописанных приборов (рис. 265 и 266). Это нетрудно сделать, если установлена кривая расходов, и тогда каждому показанию рейки соответствует определенный объем пробы. Можно, например, назначить объем пробы в 250 *см*³ для низкого или среднего расхода и отсюда получить число *см*³ пробы на 1 или 10 *м*³ расхода воды.

Такой способ взятия проб по почину Гидрометрической части в Туркестане получил название «река», в отличие от проб постоянного объема, взятие которых условно обозначалось словом «канал» (подразумевая постоянный расход потока).

Определение мутности по объему осадка не может дать особенно точного результата, так как на него влияют период отстаивания и индивидуальные приемы. Кроме того, вследствие коагуляции частиц может получиться рыхлый осадок, объем которого окажется преувеличенным. В зависимости от времени, осадок может уплотниться

в разной степени, изменяя свой удельный вес. Поэтому правильнее, высушив осадок, определить и его вес.

Выделение взвешенных частиц из суммарных проб может производиться также путем *фильтрования* через специальную бумагу, причем осадок собирается на фильтре, вставленном в воронку, а вода стекает через его поры. Фильтры вырезываются в виде кружков определенного диаметра, которые складываются вчетверо (два раза перегибая пополам) и затем при употреблении расправляются в виде конуса так, что одна половина конуса состоит из трех слоев бумаги, а другая — из одного.

Для возможности точного определения веса осадка фильтры предварительно взвешиваются в воздушно-сухом состоянии, а для очень точных исследований при этом регистрируются влажность, температура и давление воздуха. Смотря по необходимой тщательности выделения осадка, через фильтр пропускается или остаток пробы после удаления из нее верхнего слоя отстоявшейся воды, или вся проба один раз или дважды.

Фильтрование проб применяется в лаборатории и при производстве анализа детальных проб, наряду с операциями высушивания и точного взвешивания осадка.

Для учета суммарным методом растворенных в воде веществ, согласно инструкции Среднеазиатского института водного хозяйства, пробы воды берутся ежедневно объемом в 100 $см^3$ и сливаются вместе за месяц в чистые бутылки, в каждую из которых вливается предварительно 6 капель формалина. 15-го числа каждого месяца берется специальная проба на *окисляемость*, объемом в 500 $см^3$, в бутылку с красным ярлыком.

Выделение из воды растворенных веществ обычно производится путем выпаривания проб или методами объемного химического анализа (см. §§ 55 и 74).

§ 70. Обработка наблюдений над взвешенными и растворенными наносами. Обработка полевых наблюдений над взвешенными и растворенными наносами, как видно из предыдущего, состоит из двух частей:

1) операций лабораторного характера по определению относительной мутности и количества растворенных веществ, к которым можно присоединить исследование их механического и химического состава, и

2) вычисления расходов этих веществ и их объемов, пронесенных за определенные периоды времени, т. е. твердого стока.

Сущность определения мутности и количества растворенных веществ уже освещена в предыдущем параграфе, вопросов же механического анализа наносов мы коснемся вкратце ниже (в § 72).

Если на посту велись регулярные наблюдения над мутностью через определенные промежутки времени (сутки, два дня, декаду и т. д.), путем взятия проб, например, в точке средней мутности, без смешения проб или суммарным методом, то может быть составлена хронологическая таблица мутностей, из которой вычисляются средние по периодам, минимальные и максимальные значения мутности. По этим данным может быть построен график колебания мутности, наподобие изображенного на рис. 271, и кривые частоты и продолжи-

тельности мутностей Эти данные могут быть сопоставлены с изменениями различных других элементов режима: уровней, скоростей, расходов воды, уклонов, прозрачности воды, ветров и течений (при наблюдении на озерных и морских постах) и т. п.

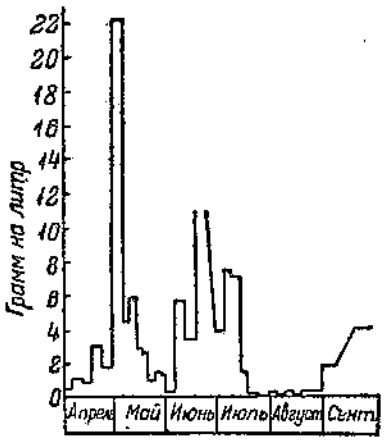


Рис. 271. График колебания мутности р. Аракса в 1927 г.

Определение *абсолютной мутности* потока, т. е. расхода взвешенных наносов, при взятии проб в живом сечении детальным способом и параллельном измерении скоростей, может быть произведено, как и вычисление расхода воды, *графическим* и *аналитическим* методами.

В первом случае обработка данных ведется следующим образом. Если относительная мутность и скорости определены в 5—6 точках на вертикали, то могут быть построены эпюры скоростей v и мутностей α для отдельных вертикалей (рис. 272). Умножая для наблюденных точек значения α на v, строим третью эпюру — *единичных расходов* мути αv.

Действительно, величину v можно рассматривать как расход воды через элемент площади живого сечения, равной единице (1 $м^2$). Тогда произведение αv представляет расход взвешенных частиц через единицу площади живого сечения около точки, в которой сделаны измерения, или единичный расход мути, а площадь эпюры αv, равная $\Omega_{\alpha v}$ — *элементарный расход* мути на вертикали, т. е. расход наносов через вертикальную полоску живого сечения шириной в 1 $м$ и высотой H $м$ (глубина вертикали).

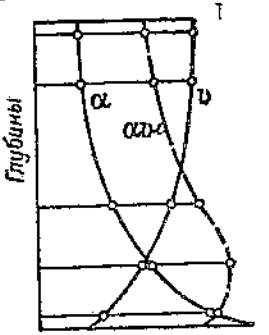
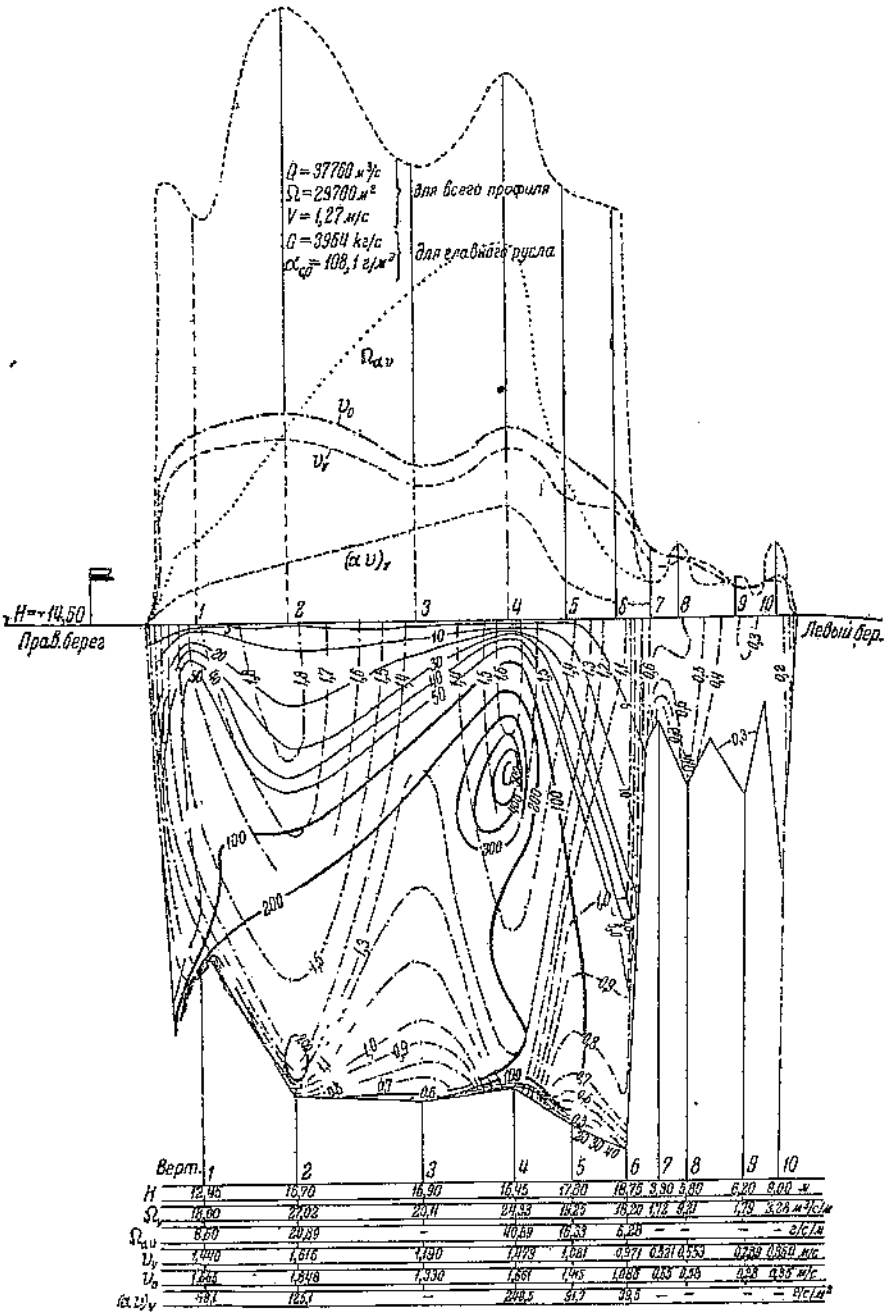


Рис. 272. Эпюра распределения мутностей, скоростей и расходов мути на вертикали.

Если разделить элементарный расход мути на вертикали $\Omega_{\alpha v}$ на глубину H, то найдем средний единичный расход мути на вертикали $(\alpha v)_v$.

Отсюда ясно, что вычисление расхода взвешенных наносов для всего живого сечения может быть произведено методом *Гарляжера* совершенно так же, как и вычисление расхода воды. Вместо эпюры средних скоростей на вертикалях v_v по ширине потока надо построить эпюру средних единичных расходов мути $(\alpha v)_v$, а вместо эпюры элементарных расходов $\Omega_v = v_v H$ — эпюру элементарных расходов мути $\Omega_{\alpha v} = (\alpha v)_v H$. Последнюю можно уточнить для получения добавочных точек между вертикалями, беря по масштабу с эпюры значения $(\alpha v)_v$ и умножая их на глубины по профилю. Однако, обычно это не делается, и строится сразу эпюра элементарных расходов мути, площадь которой дает абсолютную мутность G.

На рис. 273 приведен пример вычисления графическим методом расхода воды и взвешенных наносов (эпюры по отдельным верти-



Верт.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H	12,45	16,70	16,90	16,45	17,80	18,75	3,90	3,80	6,20	8,00	м
Ω_v	16,60	22,02	20,11	24,33	18,23	18,20	1,12	3,21	1,79	3,26	м²/с/м
$\Omega_{\alpha v}$	6,60	20,89	–	40,69	16,33	6,25	–	–	–	–	г/с/м
v_r	1,440	1,616	1,190	1,473	1,021	0,971	0,521	0,553	0,739	0,360	м/с
v_0	1,244	1,848	1,330	1,561	1,145	1,088	0,85	2,56	0,98	0,95	м/с
$(\alpha v)_r$	98,1	125,1	–	248,5	34,2	33,5	–	–	–	–	г/с/м²

Рис. 273. Графическая обработка расхода взвешенных наносов р. Волги у Чебоксарского осередка 17 мая 1926 г.

калям не показаны). Ширина профиля около 2300 *м*. Относительная мутность определена на 5 вертикалях (в 5 точках на каждой) только в главном русле (без левобережной поймы).

На профиле проведены две системы изолиний: изотахи (пунктиром) и линии равных единичных расходов наносов (сплошные линии), причем обращает на себя внимание «жила» наносов на четвертой вертикали, расположенная ближе к поверхности, чем к дну.

Для облегчения подсчетов элементарный расход мути на вертикали иногда вычисляется приближенным образом, как произведение средней мутности на вертикали a_v на элементарный расход воды Ω_v. Средняя же мутность, которую можно получить, заменяя площадь эпюры a равновеликим прямоугольником той же высоты, часто вычисляется тоже приближенно для пяти точек по формуле (40):

$$a_v = 0{,}1\ (a_0 + 3a_{0,2} + 3a_{0,6} + 2a_{0,8} + a_{1,0}),$$

а при трех точках на вертикали (или при равноотстоящих точках) — как среднее арифметическое.

Этим же путем можно по единичным расходам мути av в отдельных точках определить приближенно средний единичный расход мути на вертикали $(av)_v$. Такие приемы являются уже переходными к аналитическому способу вычисления абсолютной мутности, которое может быть проведено совершенно аналогично вычислению расхода воды (§ 49) по формулам (126) и (128):

$$g = \frac{\Omega'_{av} + \Omega''_{av}}{2} b \qquad (192)$$

или

$$g = \frac{H' + H''}{2} b \frac{(av)'_v + (av)''_v}{2}, \qquad (193)$$

где верхние значки относятся к смежным вертикалям, расстояние между которыми есть b. Полный расход мути (абсолютная мутность) складывается из частичных расходов g:

$$G = \Sigma g.$$

Возможен и комбинированный приближенный метод, когда частичные расходы воды, вычисляемые как указано в § 49 (по формулам 126 и 128), умножаются на среднюю относительную мутность между вертикалями, получаемую как полусумма средних мутностей на соседних вертикалях

$$g = q \frac{\alpha'_v + \alpha''_v}{2}. \qquad (194)$$

В этом случае в подсчет может быть введена мутность a, определенная в непосредственной близости у берегов. Если же пробы у берегов не брались, то для обоих урезов принимается мутность такая же, как и на ближайших вертикалях.

В нижеприводимых таблицах сделано аналитическое вычисление абсолютной мутности в соответствии с тремя формулами (192), (193) и (194) по данным рис. 373.[1] В расчет принято лишь главное русло до вертикали № 7, так как в пойме мутность не определялась. Для главного русла взамен результативных данных, приведенных на чертеже, из графической обработки имеем $Q = 36\,780$ *м*³/*сек*., $\Omega = 27\,220$ *м*², $V = 1{,}348$ *м/сек*. (таблицы II и III см. на стр. 272).

Расход наносов получился меньше найденного графическим методом 3974 *кг/сек*.) по I-й таблице — на 3%, II-й — на 4% и по III-ей — на 9%).

Если проба бралась в одной точке, дающей примерно среднюю мутность потока $a_{ср}$, то абсолютная мутность легко находится из формулы (191): $G = a_{ср} Q$. Точно так же определяется расход наносов, если относительная мутность в живом сечении получена суммарным методом, т. е. из ряда проб, взятых в различных точках и слитых в общий сосуд.

Таблица I [по формуле (192)]

№№ вертикалей	b *м*	H *м*	$(av)_v$ *г/сек/м*²	Ω_{av} *г/сек/м*	$(\Omega_{av})_{ср}$ *г/сек/м*	g *кг/сек*
Ур. пр. бер.		0	0	0		
	160				430	69
1		12,45	69,1	860		
	340				1475	501
2		16,70	125,1	2089		
	460					
3		16,90	—	—	3089	2410
	320					
4		16,45	248,5	4089		
	210				2861	601
5		17,80	91,7	1633		
	200				1131	226
6		18,75	33,5	628		
	120				314	38
7		3,30	0[2]	0		
						3845

Если пробы брались батометром-тахиметром и сливались вместе по отдельным вертикалям, то мы получаем сразу среднюю мутность на вертикали a_v. При этом удобно иметь ряд батометров на одной штанге, как уже указывалось в § 38. Можно в этом случае применить и интеграционный метод (§ 36), пользуясь, например, батометром-тахиметром или мензуркой (рис. 265).

Найденная тем или иным путем абсолютная мутность потока обыкновенно принимается за среднесуточную мутность. Если соответствующий расход воды несколько отличается от среднесуточного расхода, то для уточнения расхода мути последний может быть ис-

[1] Вычисления сделаны на логарифмической линейке.

[2] В предположении, что мутность в пойме равна нулю.

Таблица II [по формуле (193)]

№№ вертикалей	b м	H м	$H_{ср}$ м	$(av)_v$ г/сек/м²	$[(av)_v]_{ср}$ г/сек/м²	g кг/сек
Ур. пр. бер.		0		0		
	150		6,23		34,6	34
1		12,45		69,1		
	340		14,58		97,1	482
2		16,70		125,1		
	460					
3		16,90	16,68	—	186,8	2430
	320					
4		16,45		248,5		
	210		17,13		170,1	613
5		17,80		91,7		
	200		18,28		62,6	229
6		18,75		33,5		
	120		11,03		16,8	22
7		3,30		0[1]		
						3810

Таблица III [по формуле (194)]

№№ вертикалей	b м	Ω_v м³/сек/м	$(\Omega_v)_{ср}$ м³/сек/м	q м³/сек	α г/м³	$\alpha_{ср}$ г/м³	g кг/сек
Ур. пр. бер.		0			—		
	160		9,00	1 440		47,8	69
1		18,00			47,8		
	340		22,51	7 650		62,7	480
2		27,02			77,5		
	460		23,57	10 840			
3		20,11			—	122,8	220,6
	320		22,22	7 110			
4		24,33			168,0		
	210		21,79	4 580		126,5	580
5		19,25			84,9		
	200		18,73	3 745		59,7	224
6		18,20			34,5		
	120		9,96	1 195		34,5	41
7		1,72					
				36 560			3600

правлен по отношению измеренного расхода воды к принятому за среднесуточный.

Так как ежедневное определение абсолютной мутности детальным способом (при взятии большого числа проб в живом сечении и изме-

[1] В предположении, что мутность в пойме равна нулю.

рении скоростей) сложно и затруднительно, то, казалось бы, проще всего попытаться, по аналогии с расходами воды, установить зависимость между расходами мути и высотой горизонта воды на посту, т. е. *кривую расходов* мути, что равноспильно установлению связи между расходами мути и расходами воды.

В большинстве случаев, однако, установить такой зависимости не удается, так как между этими элементами нет прямой связи. Так, обычно наблюдается, что вода ранних паводков более загрязнена, чем вода последующих паводков, и максимум расхода воды не совпадает с максимумом мутности.

Если наблюдения над мутностью ведутся регулярно через определенные промежутки времени, как указывалось в начале этого параграфа, и имеется кривая расходов воды, то, вычисляя средние рас-

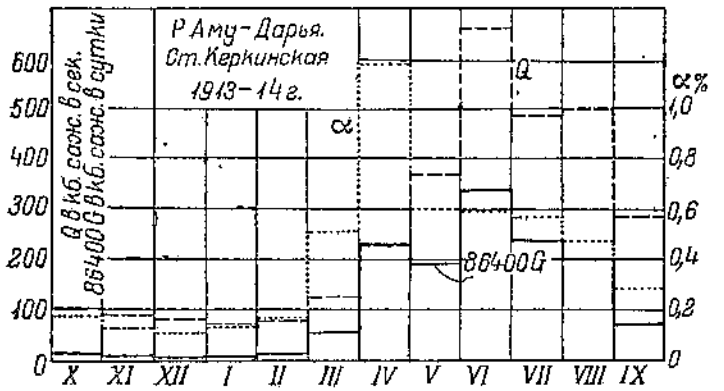


Рис. 274. График колебания расходов воды, абсолютной и относительной мутности.

ходы за промежутки времени, для которых имеется средняя относительная мутность, мы получим приближенно средние расходы мути за те же периоды

$$G_{ср} = \alpha_{ср} Q_{ср}.$$

На рис. 274 приведен график колебания среднемесячных расходов воды, абсолютной и относительной мутности р. Аму-Дарьи. Как видно, ход относительной мутности значительно отличается от хода расходов воды. Мутность дана по объему и вместо секундных расходов мути отложены пропорциональные им расходы мути за сутки (86400 G).

В зависимости от частоты взятия проб или периодов времени, за которые пробы сливаются вместе, такие графики могут быть более или менее детальными.

Вычисление расхода растворенных наносов производится тем же путем, умножая относительное содержание растворенных солей на расход воды. Относительная соленость обычно имеет минимум в период паводка при стоке пресных поверхностных вод и максимум в зимнее время, когда река питается главным образом грунтовыми во-

дами. Абсолютная соленость, т. е. расход растворенных солей, в общем следует изменениям расхода воды потока.

Как для взвешенных, так и для растворенных наносов, когда выяснена картина изменения их расходов по времени, обычными методами может быть подсчитан сток по периодам и годовой, а также частота, продолжительность и характерные значения расходов (средние, максимальные, минимальные, медианные и т. п.).

§ 71. Методы непосредственного учета донных наносов. Для учета передвигаемых потоком донных наносов, как уже отмечалось, не существует вполне удовлетворительных приемов и методов. Одни из них имеют целью *непосредственное измерение* количества передвигающегося по дну твердого материала при помощи так называемых *донных батометров*, другие основаны на изучении *деформаций*

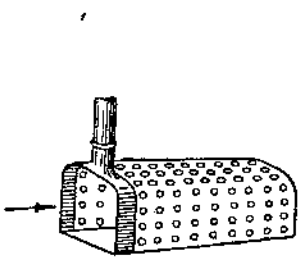


Рис. 275. Батометр Курцмана.

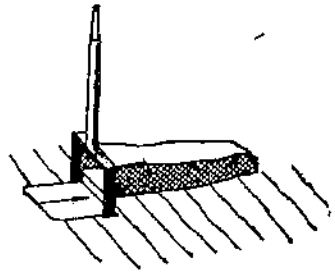


Рис. 276. Батометр Шафернака.

русла, являющихся результатом работы воды и передвижения наносов.

Первые попытки учета донных наносов с помощью донных батометров относятся к сравнительно недавнему времени. В отличие от обыкновенных батометров, служащих для взятия проб воды, эти приборы должны улавливать лишь передвигающийся по дну твердый материал, и самый прибор в этом отношении должен являться своего рода батометром длительного наполнения. Трудность создания целесообразной конструкции такого прибора очевидна, если принять во внимание неровное, движущееся дно потока и то обстоятельство, что нарушение прибором естественных условий течения вызывает тотчас и изменение связанного с ними движения наносов.

На рис. 275 изображен донный батометр *Курцмана*, примененный им на тирольских реках в 1918 г. Он представляет собой железный ящик, прикрепленный к концу штанги и открытый навстречу течению; все стенки его, кроме нижней, сделаны решетчатыми. Благодаря уменьшению скорости течения в приборе наносы почти не попадают в него, а идут мимо.

Другой прибор подобного типа был предложен *Шафернаком* в 1920 г. (рис. 276). Он имеет вертикальную рамку с горизонтальным металлическим листом внизу, по которому должны подходить наносы. В основной рамке движется вверх и вниз при помощи сплошной штанги, помещающейся внутри полой штанги, другая рамка, к которой прикреплен мешок для улавливания донных наносов. Когда основная рамка установлена и врезалась в дно, опускается мешок внутренней штангой, и по истечении определенного времени прибор вынимается. Недостатки этого прибора те же, что и прибора *Курцмана*.

Более совершенным является батометр *Гончарова* (рис. 277), примененный им в 1925 г. на р. Кубани и состоящий из железного ящика, постепенно расширяющегося вниз по течению, длиной 50 *см*. Ширина входа 10 *см*, поперечное сечение в месте выхода воды в 2,5 раза больше входного. Батометр опускается на штанге, и наносы скопляются в его задней части. Против середины выходного отверстия установлен батометр-тахиметр с трубкой малого диаметра, обеспечивающей медленное его наполнение. Этим путем учитываются одновременно скорость течения и мутность придонных слоев.

Исследования, произведенные *Шамовым* в лаборатории Среднеазиатского института водного хозяйства, показали, что в батометре *Гончарова* донные наносы не продвигаются в заднюю часть прибора,

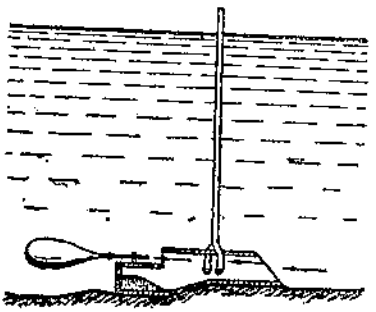


Рис. 277. Батометр Гончарова.

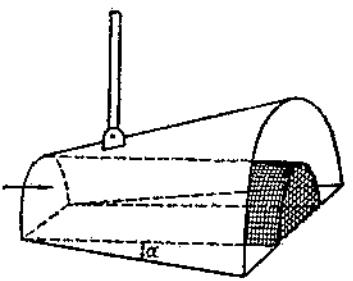


Рис. 278. Батометр Шамова.

а откладываются перед выходным отверстием, при больших же скоростях, вследствие образования вихрей, выбрасываются через это отверстие. Кроме того, углубление в задней части прибора затрудняет вдавливание его в дно и установку в надлежащем положении.

Шамовым предложен батометр в виде конического кожуха с плоским дном, внутри которого помещается сетка цилиндрической формы (рис. 278). Расширяющийся кожух создает завихрение потока за прибором и пониженное давление, вызывающее увеличение скорости в приборе, которая даже при наличии сетки может быть сделана больше естественной. Благодаря этому преодолевается сопротивление наносов при входе, где вследствие неровностей дна и неправильной установки возможно образование порога, препятствующего продвижению наносов, особенно крупных.

Максимальное вовлечение в прибор наносов получается при угле α около 13°. Величина этого угла должна выбираться в зависимости от крупности наносов и размеров отверстий сетки батометра. Этот вопрос еще не является вполне выясненным, хотя батометры *Шамова* уже применялись в некоторых экспедиционных исследованиях в 1932 г.

Аполловым для учета донных наносов на Волге, Араксе и Куре (1927—28 г.) применялась сконструированная им *донная ванночка*, схема которой показана на рис. 279. Она сделана из толстой листо-

вой меди и имеет квадратное дно (18 × 18 *см*), к которому с четырех сторон прикреплены на шарнирах откидывающиеся крылья трапецоидальной формы (высотой 12 *см* и шириной поверху 30 *см*). На эту конструкцию в развернутом виде наклеена тонкая резина, перекрывающая также треугольные промежутки между смежными крыльями. К двум противоположным крыльям, длинные стороны которых располагаются вдоль по течению, прикреплены две крышки, закрывающие ванночку сверху, когда она находится на весу.

В центре ванночки укреплена стойка, на которую надета прямоугольного сечения трубка с компасной коробкой наверху. Последнюю охватывает рамка, к которой прикрепляются руль и тросики, идущие к трапецоидальным крыльям. Стойка оканчивается стальной иглой, которая поднимает стрелку компаса, когда прибор встанет на дно и крылья ванночки опустятся. Когда ванночка находится на весу, игла опущена и стрелка лежит неподвижно на зубчатом лимбе (расстояние между зубцами 6°), а руль направляет ванночку так, чтобы переднее заостренное крыло расположилось прямо навстречу течению, боковые же крылья с крышками — вдоль него.

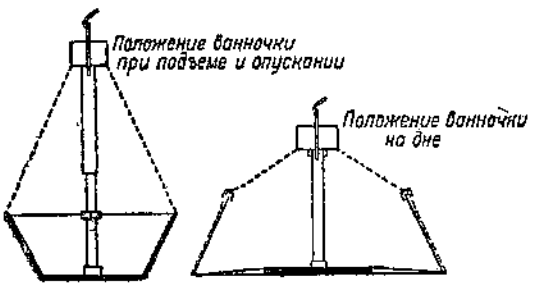


Рис. 279. Ванночка Аполлова.

Прибор спускается на тросе, при установке на дно трос ослабляется, чтобы ванночка раскрылась, и одновременно пускается секундомер. По истечении некоторого времени секундомер останавливают и ванночку медленно поднимают. По положению стрелки на зубчатом лимбе компаса определяется азимут направления течения (например в море), вода же с наносами сливается в воронку и исследуется обычным способом.

Так как в ней содержатся и донные и взвешенные наносы, то для их разделения поступают следующим образом. Ванночкой последовательно берется несколько отдельных проб воды, постепенно увеличивая продолжительность ее пребывания на дне (первый раз 10—20 сек., второй раз 30—40 сек., третий раз 2 мин., четвертый раз 10—15 мин.).

Общее количество наносов в ванночке:

$$P = pT + W, \tag{195}$$

где p — секундное количество донных наносов, поступавших на ванночку, T — время нахождения ванночки на дне и W — количество взвешенных наносов.

Последнее не зависит от времени пребывания ванночки на дне, поэтому, составив несколько уравнений типа (195) для разных T, можно найти средние значения p и W.

Если донные наносы успели пройти всю ванночку, т. е. установился их транзит, то общее количество наносов станет постоянным и равным P_T. Отсюда можно определить время, в течение которого донные наносы прошли всю ванночку:

$$T_T = \frac{P_T - W}{p},$$

и скорость их движения:

$$v = \frac{L}{T_T},$$

где L — длина раскрытой ванночки.

На изысканиях в устье р. Дона в 1927 г. был испробован батометр в виде короткой трубы с фланцем (рис. 280), оканчивающейся конусом, внутри которого закреплен стержень-штанга, выходящий на поверхность воды. Прибор осторожно вдавливается в дно до уровня фланца, причем в него сваливается часть окружающего грунта. После этого по штанге пускается круглый металлический диск с отверстием для штанги, который отделяет попавший в прибор грунт от начинающих поступать донных наносов. Момент пускания диска и считается началом наблюдений. По истечении некоторого времени пускается второй такой же диск, а затем для контроля через равный промежуток времени — третий, после чего

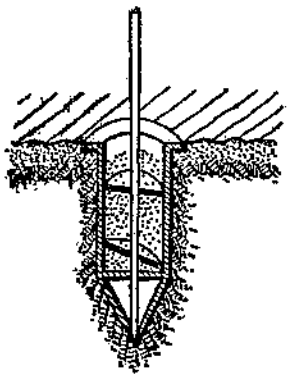


Рис. 280. Трубчатый донный батометр.

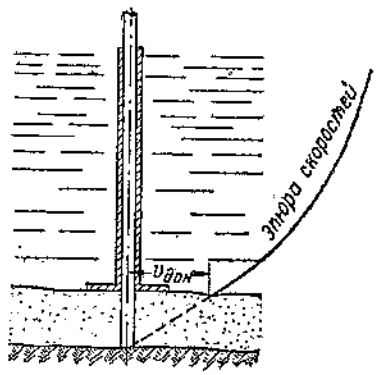


Рис. 281. Щуп Тейберта.

прибор вынимается. По объемам наносов между дисками определяется расход донных наносов.

При работе с этим прибором обнаружились значительные трудности. Поток размывал грунт у прибора, обнажая часть трубы, а это, в свою очередь, способствовало отклонению донных струй и наносов. Кроме того, оказывалось весьма трудным вдавить прибор в дно на требуемую глубину и проконтролировать правильность его установки.

Немцем *Тейбертом* был предложен особый прибор для измерения мелких песчаных наносов, движущихся по дну слоем некоторой толщины. *Тейберт* предложил определять эту толщину специальным донным щупом (рис. 281), состоящим из полой цилиндрической штанги, оканчивающейся плоским диском, не погружающимся в песчаный поток. Внутри полой штанги передвигается вторая сплошная штанга, которая входит в полужидкий поток, достигая неподвижного дна.

Полагая, что верхние частицы песчаного слоя движутся со скоростью, равной донной, а нижние со скоростью, равной нулю, и что скорости в этом слое изменяются по закону прямой линии, *Тейберт* считает среднюю скорость песчаного потока на вертикали равной половине донной скорости водного потока и отсюда, определив удельный вес слоя, находит расход донных наносов. Главное затруднение при этом получается в правильном определении толщины передвигающегося слоя песка и донной скорости водного потока. Кроме того, предположения, на которых основан этот способ, в известной мере произвольны и не оправдываются опытом, почему и прибор *Тейберта* не получил распространения.

На рис. 282 изображен донный батометр *Полякова* (1931 г.) для песчаных наносов. Он состоит из трех частей, соединенных шарнирно: полого трамплина, ловушки с крышками и поперечными не-

реборками, куда проваливаются наносы, и хвостовой части. Ловушка раскрывается благодаря противовесам крышек при установке на дно (одновременно с чем действует донный контакт) и закрывается при подъеме.

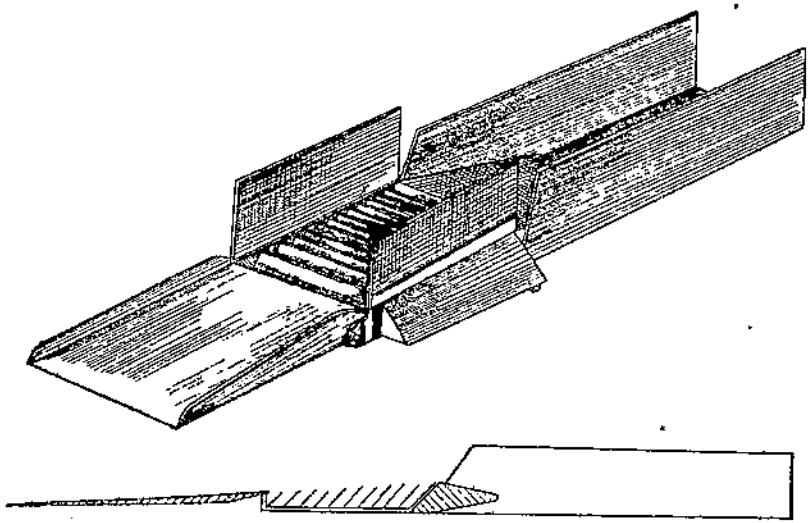


Рис. 282. Батометр Полякова.

При сравнительных испытаниях батометров *Полякова, Аполлова* и *Лосиевского*[1] в условиях мелких песчаных наносов (на Средней Волге в 1935 г.) батометр *Полякова* дал наилучшие результаты, хотя и им улавливались, повидимому, не все донные наносы. На ванночке *Аполлова* часть наносов задерживалась, образуя неподвижный слой, а часть проходила транзитом. Кроме того, все приборы в момент установки на дно вызывали взмучивание песка и благодаря этому давали неправильные показания при кратковременной выдержке. Испытания установили, что для получения при помощи батометра *Полякова* более надежных результатов необходимы многократные повторные наблюдения с учетом лишь тех наносов, которые попадают в прибор спустя некоторое время после его установки (около 1 мин.). Для этого приходится каждое наблюдение разбивать на два наблюдения: с короткой и более продолжительной выдержкой, которая определяется опытом.

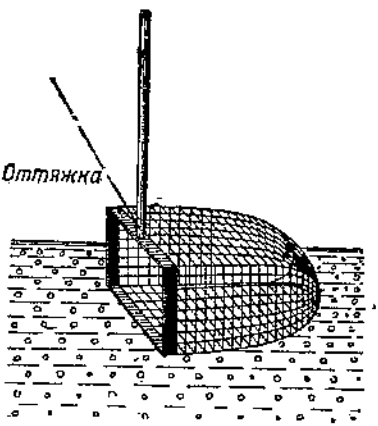


Рис. 283. Батометр-сетка.

Для учета влекомых потоком по дну крупных наносов могут

[1] Батометр *Лосиевского* отличается от батометра *Полякова* устройством ловушки и некоторыми деталями.

применяться специальные *сетки*, наподобие изображенной на рис. 283. Размеры ячеек определяются характером донных наносов и условиями задания.

Скорости движения крупной гальки, перемещающейся главным образом во время паводков, могут быть получены и путем окрашивания камней или, лучше, приготовления искусственной гальки из окрашенного бетона; последний бросается в реку, а затем разыскивается место, где она остановилась.

Наибольшие затруднения встречает измерение расхода крупных камней, влекомых быстрыми горными потоками. *Аполлов* предложил с этой целью высверливать в отдельных булыгах отверстия, закладывая в них взрывчатое вещество, закрытое изоляцией, через которую проходит бикфордов шнур, смотанный спиралью. Шнур и отверстие заделываются цементом.

Булыгу в определенном месте бросают в воду, зажигая предварительно конец шнура и пуская секундомер. Бикфордов шнур горит в воде, и при взрыве, сопровождающемся выбрасыванием столба воды, определяется его положение и останавливается секундомер. Отсюда определяется скорость движения камней.

Кроме описанных приборов, можно применять установку в дне в уровень с его поверхностью открытых сверху ящиков или укладывать на дно кусок парусины, прикрепляемый кольями, наблюдая в обоих случаях за некоторый период времени объем отложившихся наносов.

Наконец, на небольших потоках можно перегородить русло крупными камнями, между которыми проходит вода. Влекомый по дну гравий будет отлагаться перед этой плотиной, и нужно определить объем отложившихся наносов и время их накопления, чтобы найти расход наносов. Недостаток этого способа в том, что он не применим к сколько-нибудь значительным потокам и, создавая подпор, уменьшает скорости течения и нарушает естественный режим движения потока и наносов.

Расход донных наносов при измерениях на ряде вертикалей поперечного профиля вычисляется весьма просто. Если секундный расход, полученный батометром, есть p, то расход на погонный метр ширины русла:

$$p_b = \frac{p}{b},$$

где b — ширина входного отверстия батометра.

Полный расход наносов в профиле может быть получен отсюда обычным аналитическим или графическим методом. В последнем случае на поперечном профиле откладываются вверх на вертикалях величины p_b и строится эпюра, площадь которой планиметрируется или вычисляется.

§ 72. Наблюдения над наносами путем изучения деформаций русла и донных отложений. К наиболее старым и давно применяемым в Европе и Америке методам учета донных наносов относятся наблюдения над передвижением в реках песчаных отмелей и кос, заключающиеся в определении скорости их перемещения и объемов перемещающегося грунта. Такие наблюдения осуществлялись на Днепре *Лелявским*, а позднее *Энгельсом* в лабораторной обстановке (в Дрездене).

Однако этим способом наносы обычно передвигаются не по всей ширине реки, а лишь в части ее — у берегов и в редких местах, где образуются косы. В наиболее же глубоких местах с наибольшими скоростями и расходом донных наносов движение последних происходит непрерывно без образования кос и, таким образом, не учитывается вовсе.

Наблюдения над деформациями русла, сводящиеся к периодическим съемкам и подсчетам объема отложившегося или вымытого

грунта, в сущности страдают тем же недостатком, не учитывая наносов, проходящих транзитом.

Если объем грунта русла на определенной площади над некоторой плоскостью, взятой ниже наинизшей отметки дна, изменился за некоторый период времени на какую-то величину, то эта последняя и принимается за объем донных перемещений размыва или отложения. При этом, конечно, изменения объемов в разных местах исследуемого участка будут получаться разные, в одних положительные, в других отрицательные, и в связи с движением не только донных, но и взвешенных наносов. Результаты таких измерений выявят на самом деле лишь характер деформаций, а не количественную сторону движения наносов.

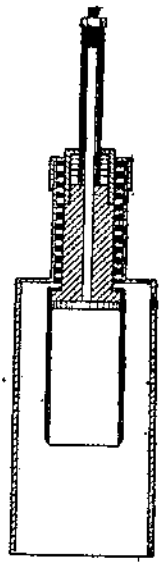


Рис. 284. Штанговый донный щуп.

Съемка русла и промеры глубины производятся обычными способами (§ 44). Так как такие съемки должны быть достаточно точными, то они требуют большой затраты времени и средств, а при проходе высоких вод становятся особенно затруднительными. Проще, если местные условия допускают это, — забивка в поперечном профиле постоянных вешек, у которых периодически производятся промеры глубин, или разбивка нескольких постоянных промерных створов.

Те же методы с бо́льшим успехом могут применяться для определения количества отлагающихся наносов (донных и взвешенных) в водохранилищах, в устьях рек, в местах нарастания подводных отмелей или баров (в озерах и морях).

Иногда с этой целью расставляются контрольные вехи, возле которых на дно рассыпается охотничья дробь, металлические опилки или тяжелая краска (например сурик). По прошествии определенного времени (через несколько месяцев) в этих местах берутся пробы грунта донным щупом или буровым стаканом, не нарушающим напластования слоев, и по положению дроби, опилок или краски судят о толще отложившихся наносов.

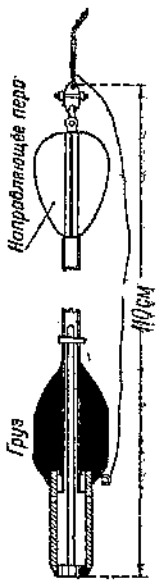


Рис. 285. Донный щуп Аполлова.

На рис. 284 изображен в разрезе штанговый *донный щуп*, имеющий внутренний металлический стакан, навинчиваемый на штангу и помещенный в цилиндр, служащий воздушным колоколом. Внутренним стаканом, вдавливаемым в дно, вырезывается столбик грунта, наружный же цилиндр благодаря сальнику скользит вверх. При погружении прибора в вертикальном положении в воду, воздух в цилиндре сжимается гидростатическим давлением воды, однако высота цилиндра такова, что даже на глубинах до 5 *м* вода дойдет только до низа внутреннего стакана. Когда наружный цилиндр станет на дно, стакан опускается, вытесняя воду, и врезается в дно. Проба получается высотой 10 *см* и диаметром 5 *см*, и для извлечения ее из стакана в ненарушенном виде служит поршенек, которым она выталкивается.

Взятые пробы на месте подвергаются осмотру, расчленению на слои, измерению их высоты и описанию.

Аполловым для работы на больших глубинах и на ходу судна сконструиро-

вая донный щуп, опускаемый на тросе (рис. 285). Основной частью его служит режущий стакан высотой 12 *см* и диаметром 4 *см*, в котором находится поршень на штоке, проходящем через груз в верхнюю трубку. В последней прорезаны две продольные щели, в которых скользит поперечная ручка, продетая через шток.

Верхняя трубка оканчивается направляющим пером, выше которого имеется кольцо, служащее для одевания пружинного зажима. Трос прикрепляется к кольцу у основания груза и присоединяется к пружинному зажиму сверху со слабиной между ними. При падении щупа поршень находится в самом нижнем положении, как показано на рисунке, и грунт, входя в стакан, поднимает поршень, который не встречает сопротивления, благодаря отверстиям вверху стакана для выхода воды. При подъеме щуп срывается с верхнего кольца и вынимается в перевернутом состоянии, что позволяет брать легко вымываемые грунты, как, например, песок и гравий.

Проба из прибора в виде цилиндрического столбика выдавливается поршнем так же, как в предыдущем случае, при помощи поперечной ручки, прикрепленной к штоку.

К приборам этого типа относятся стратометр *Перфильева* (для взятия столбиков ила), трубка *Экмана* (морская) и другие.

Менее удовлетворительны приборы, берущие пробы грунта без сохранения его напластования. К ним относится *дночерпатель Леже* (рис. 286), состоящий из двух тяжелых медных чашек, вращающихся на горизонтальной оси, прикрепленной к стержню, который подвешивается на тросе. Чашки удерживаются открытыми при помощи щеколды, которая при ударе о дно откидывается, в связи с чем чашки закрываются. В этом приборе наиболее мелкие частицы при подъеме вымываются через щели, прибор часто не закрывается или ничего не захватывает.

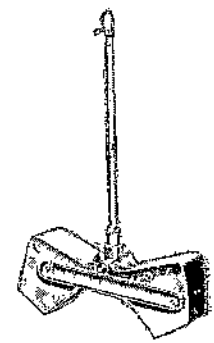


Рис. 286. Дночерпатель Леже.

Приборы этого типа (дночерпатели *Экмана-Берджа*, *Петерсена* и др.) и еще более простые (*драги*) применяются главным образом при озерных и морских исследованиях.

§ 73. Механический анализ наносов и их химический состав. Механический анализ речных наносов, характеризующихся однообразием минералогического состава и представляющих главным образом смеси песка и глины, имеет целью определение количества частиц различной крупности, т. е. разделение частиц на группы или фракции с определенными размерами зерен. Тесная связь между механическим составом наносов и гидродинамическими свойствами водных масс обусловливает необходимость изучения наносов в первую очередь именно путем механического анализа.

Подробное рассмотрение и изучение способов механического анализа грунтов входят в задачи гидрогеологии, поэтому здесь мы отметим лишь сущность наиболее употребительных методов.

В СССР является общепринятым деление мелких частиц на 4 фракции:

1) диаметр меньше 0,01 *мм* (гидравлическая крупность 0,2 *мм/сек.*);
2) „ от 0,01 до 0,05 *мм* („ „ 2,0 *мм/сек.*);
3) „ от 0,05 до 0,25 *мм* („ „ 21,0 *мм/сек.*);
4) „ больше 0,25 *мм* (гидравл. крупн. больше 21,0 *мм/сек.*).

Более крупные частицы представляют:

1) песчаные частицы диаметром 0,25—0,5 *мм* — мелкий песок,
2) „ „ „ 0,5 —1,0 *мм* — песок средней крупности,
3) „ „ „ 1—3 *мм* — крупный песок,
4) частицы диаметром 3—10 *мм* — гравий и хрящ,
5) „ „ более 10 *мм* — камни.

Для отделения и разделения на фракции более крупных частиц обычно прибегают к просеиванию материала через набор сит с определенными размерами отверстий.

Для мелких частиц удобнее всего способы анализа, основанные на гидравлических свойствах наносов.

Здесь различаются 4 группы методов:

1) методы непосредственного разделения породы на фракции,
2) методы отмучивания,
3) методы, основанные на изучении мутности отстаивающегося столба воды,
4) методы, основанные на изучении хода образования осадка.

К первой группе методов относится механический анализ по *непрерывному способу*, который состоит в том (рис. 287), что порода осаждается в перевернутой вверх дном высокой трубке *A*, наполненной водой, причем нижний конец трубки, имеющий коническое сужение, погружен в ванночку с водой и под ним непрерывно движется бумажная лента *B* с помощью хронографа, который отмечает на ней время через ½ секунды.

В момент перевертывания трубки все частицы начинают падать одновременно, но с разной скоростью. Из трубки они попадают на бумажную ленту — сперва на нее ложатся крупные песчинки, потом все более мелкие, и в результате получается грядка, в которой частицы расположены в порядке убывающей крупности. Осаждение прекращается, когда выпадут частицы, имеющие скорость падения 2 *мм/сек.*, после чего лента снимается и, пользуясь записью времени и зная высоту трубки *A*, вся грядка делится на произвольное число фракций.

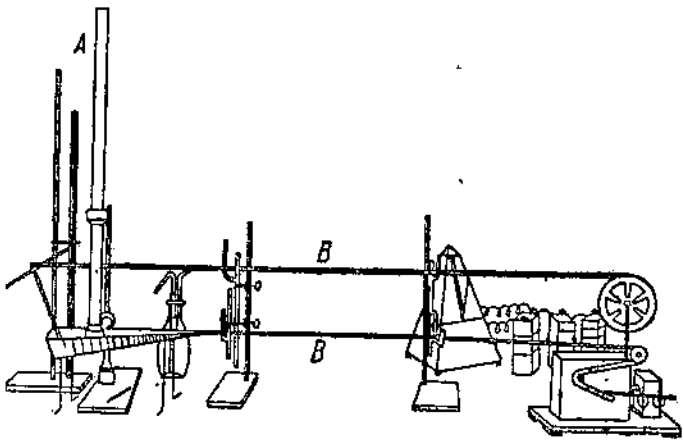


Рис. 287. Оборудование для механического анализа по непрерывному способу.

Для полевого исследования песчаных наносов удобна *аналитическая трубка* (рис. 288), представляющая собой колбу с длинным горлышком — около 400 *мм*. Анализируемая порода помещается в колбу, затем трубка наполняется почти доверху водой и закрывается пробкой. Боковым движением порода в колбе взмучивается, трубка перевертывается и подвешивается на проволочной рамке. С этого момента отсчитывается время по секундомеру или метроному и наблюдается нижняя с делениями часть трубки. Сперва записываются секунды в момент выпадения крупных зерен, а затем — моменты, когда нарастающий осадок достигает последовательно делений от 1-го до 10-го, начиная снизу. Каждое деление отвечает $^1/_{10}$ общего объема взятой породы, и, таким образом, получается анализ с 10 фракциями.

Усовершенствованием аналитической трубки является *фракционер Аполлова*, в котором стеклянная трубка с верхней съемной частью (куда помещается порода), общей длиной 2 *м*, переходит внизу в чередующиеся медные и резиновые трубки. Последние (числом 4) при осаждении породы поочередно зажимаются, начиная снизу, в моменты, соответствующие выпадению определенных фракций.

Мелкие частицы обычно выделяются *методами отмучивания*. Последние заключаются в том, что исследуемая порода тщательно размешивается с водой, после чего ей дают некоторое время отстояться. Затем верхний слой воды той или иной высоты сливается при помощи сифона, в сосуд доливается чистая вода и повторяется взмучивание, отстаивание и сливание. Такие операции производятся до тех пор, пока сливаемый слой воды не станет совершенно чистым.

Высота сливаемого слоя h и время отстаивания T назначаются так, чтобы частное $\frac{h}{T} = \phi$ представляло собой границу гидравлических крупностей двух фракций, разделяемых путем анализа.

Если мы хотим, например, удалить частицы диаметром меньше 0,01 *мм*, имеющие гидравлическую крупность 0,2 *мм/сек.*, сливая слой высотой 20 *мм*, то время, по истечении которого надо производить сливание, будет равно $T = \frac{20}{0{,}2} = 100$ сек.

За это время из верхнего слоя выпадут все частицы с гидравлической крупностью больше 0,2 *мм/сек*. Часть более мелких частиц останется после сливания в нижнем слое, и каждое новое сливание будет уменьшать их количество, так что после достаточного числа сливаний можно добиться почти полного удаления определенной фракции.

В методе *Сабанина* отмучивание происходит в стоячей воде, в приборах *Шене* и *Копецкого* — в восходящем столбе воды.

Для быстрого определения состава крупных наносов в оросительных каналах *Кеннеди* (в Индии) применялся прибор, показанный на рис. 289. Вода из канала накачивается в часть прибора L, откуда через отверстия в воронке S поступает в цилиндр M. Выпускная трубка N переменной высоты служит для регулирования скорости движения воды в приборе. Вода пропускается в части прибора L и отверстиях воронки S со скоростью большей, чем гидравлический размер самых крупных частиц наносов, и при этом частицы, имеющие крупность более определенной (при соответствующей скорости в цилиндре M), выпадают в трубку K.

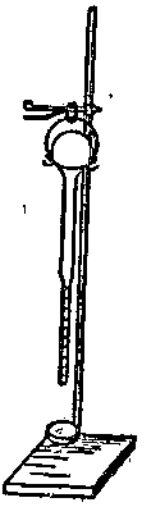


Рис. 288. Аналитическая трубка

Методы механического анализа, основанные на изучении мутности столба воды, первоначально равномерно перемешанной с анализируемой породой, были предложены в России еще в 1911 г. и значительно позже (в 1922—24 гг.) вновь открыты в Англии и Америке под названием способов *Робинзона* и *Одена*.

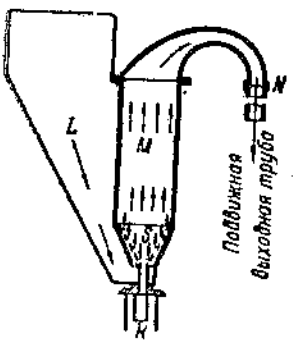


Рис. 289. Прибор Кеннеди.

Если, равномерно взмутив воду, мы дадим ей отстаиваться и затем через некоторый промежуток времени T возьмем пробу на глубине h, то в ней не окажется ни одной частицы гидравлической крупности $\phi > \frac{h}{T}$, так как за это время все они успели опуститься на глубину больше h. Частиц же меньшей крупности будет столько же, как в начальный момент, так как оседание непрерывно пополняется поступлением новых частиц сверху.

Таким образом, крупность частиц в пробе определяется неравенством:

$$0 < \phi < \frac{h}{T},$$

и, зная начальную относительную мутность воды α_0 и мутность пробы α_1, легко производить механический анализ, исследуя пробы, взятые в определенные моменты на разных глубинах. Пробы выпариваются, а затем сухой остаток взвешивается, причем крупность частиц уже известна, а их относительное содержание в породе равно α_1/α_0 %.

Способы анализа, основанные на изучении хода *образования осадка*, опираются на закономерность его нарастания с течением времени. Если порода предварительно равномерно размешана, то в любой последующий момент количество выпавшего на дно осадка составляется из двух частей: крупных частиц, скорость падения которых превышает предел $\frac{H}{T}$ (H — полная высота столба воды), и мелких, имеющих гидравлический размер ниже этого предела. Крупные частицы представляют полное количество частиц такого рода, а количество мелких частиц в осадке растет пропорционально времени и может быть учтено.

Быстрота и подробность механических анализов являются чрезвычайно желательными, так как такие приемы имеют большое значение с точки зрения исследования наносов в связи с движением воды. При постройке донных наносов, например, чрезвычайно важно собрать массовый материал и провести тысячи анализов, что затруднительно сделать путем лабораторного исследования. Поэтому особенно удобными являются методы, допускающие их применение в полевой обстановке и требующие минимальной затраты времени.

В результате механического анализа получается характеристика состава наносов в виде таблиц по отдельным фракциям. Для того, чтобы изобразить графически результаты анализа, применяются два способа. Основной способ заключается в том, что по оси абсцисс откладывается крупность частиц, а по оси ординат — величина фракций, отнесенная к единице длины абсциссы.

Приводим пример таблицы анализа:

Фракции *мм/сек.*	Вес фракций в 1 *л* воды *мг*	Ордината кривой *мг*	Абсцисса кривой *мм/сек.*
0—0,2	398,9	347,6	1
0,2—2,0	296,3		
2—4	188,8	94,4	3
4—8	320,5	80,1	6
8—12	161,8	40,5	10
12—16	86,7	21,7	14
16—24	99,3	12,4	20
24—30	40,6	6,8	27
30—35	1,9	0,4	32,5
	1594,8		

По этим данным составлен график (рис. 290).

За границей чрезвычайно распространено изображение результатов анализа в виде суммарных кривых, когда все фракции, начиная с самой мелкой, последовательно суммируются и получающиеся суммы откладываются в виде ординат. При этом полный вес фракций принимается за 100%, а механический состав породы иногда характеризуется отношением площадей a к b (рис. 291). Преобладание мелких фракций дает кривую, обращенную выпуклостью вверх, преобладание крупных — кривую, выпуклую книзу. При одинаковом содержании всех фракций кривая обратилась бы в диагональ.

Исследование *химического* состава речных наносов особенно важно, если вода используется для орошения и взвешенные наносы выносятся на поля, где и оседают, удобряя почву и обусловливая в той или иной мере ее плодородие. В этом отношении химическим

анализом выявляется содержание в них, главным образом, кремнезема, глинозема, органических веществ, солей кальция, магния, калия и натрия, угольной и фосфорной кислот.

§ 74. Наблюдения над температурой и физико-химическими свойствами воды. Наблюдения над температурой воды у поверхности и на небольших глубинах производятся с помощью *родниковых* термометров (рис. 292), имеющих деления через 0,2° или 0,1° Ц, а иногда, при более грубых наблюдениях, — через 0,5°.

Термометр помещается в медной цилиндрической оправе с продольным прорезом для шкалы, шарик термометра окружен резино-

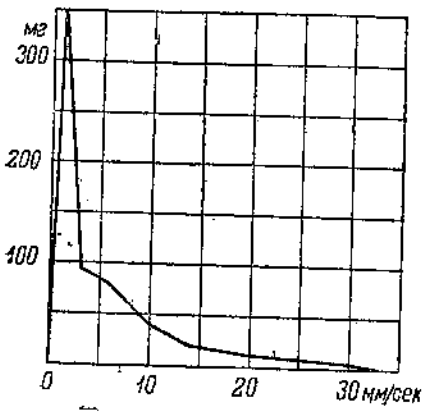


Рис. 290. График распределения фракций наносов.

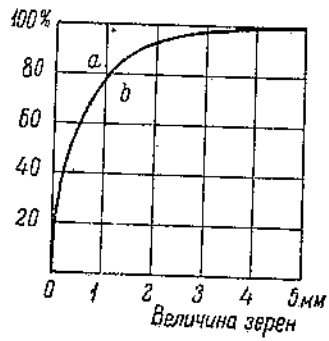


Рис. 291. Суммарная кривая фракционного состава наносов.

вым колпачком и снаружи особым резервуаром. Термометр опускается в ведро со свежезачерпнутой водой или при помощи веревки непосредственно в реку, озеро или море, где держится в течение 3—5 минут.

При пользовании простым термометром без оправы шарик со ртутью плотно оборачивается со всех сторон ватой или паклей для того, чтобы после извлечения из воды температура его некоторое время оставалась неизменной.

Глубинные (батометрические) термометры простейшего типа представляют дальнейшее развитие родникового термометра. Резервуар, в котором помещается шарик со ртутью, закрыт сверху крышкой, которая сама поднимается при опускании термометра, скользя вверх и открывая доступ воде в резервуар, и закрывается при подъеме. Благодаря наличию воды в резервуаре, шарик некоторое время сохраняет температуру того места, откуда взята вода.

Усовершенствованные термометры этого рода имеют крышку с пружиной; крышка открывается при помощи специальной веревки только на той глубине, где нужно измерить температуру воды, и затем закрывается.

При измерении температур воды на больших глубинах (в озерах и морях) применяются *опрокидывающиеся* термометры, из которых особенно распространены термометры *Негретти-Замбра* и *Рихтера*.

Они (рис. 293) состоят из двух термометров — главного и вспомогательного, позволяющего исправлять показания главного термометра. Трубка со ртутью главного термометра оканчивается вверху небольшим резервуаром, а внизу — изогнутым расширением, переходящим в крючкообразный капилляр и затем в цилиндрический при-

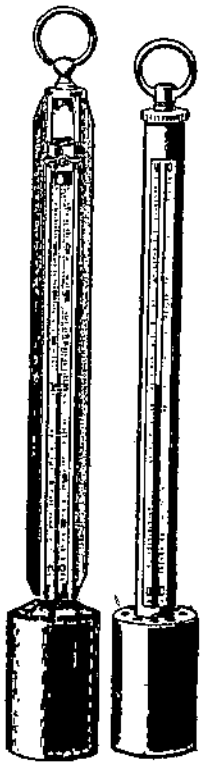


Рис. 292. Родниковые термометры.



Рис. 293. Опрокидывающийся термометр Рихтера.



Рис. 294. Оправа для опрокидывающихся термометров.

емник. Если опрокинуть этот термометр, то столбик ртути в капилляре разрывается и падает на дно верхнего резервуара, причем высота оторванного столбика соответствует температуре приемника. Вспомогательный термометр имеет устройство обычного типа. Оба термометра имеют шкалы с опрокинутыми цифрами и окружены толстостенной стеклянной трубкой, нижняя часть которой также наполняется ртутью почти до высоты приемника главного термометра и отделена от остальной части пробкой.

Чтобы термометр перевернулся на определенной глубине, его заключают в металлическую оправу, вращающуюся на горизонтальной оси в рамке; переворачивание достигается пусканием по лотлинию посыльного груза (см. § 29 и 68). На рис. 294 изображена рамка с оправами для двух опрокидывающихся термометров.

Иногда к лотлинию прикрепляют целый ряд термометров, чтобы сразу определить температуры на разных глубинах. В этом случае устраивают так, что при переворачивании верхнего термометра освобождается подвешенный к нему груз, который переворачивает следующий термометр и т. д. Таким образом опрокидывание всех термометров совершается почти одновременно. Определение температур воды на больших глубинах (при морских и озерных исследованиях) обыкновенно сочетается с взятием проб воды (§ 68).

Специальные термометры для измерения температур воды близких к 0° (положительных и отрицательных) с точностью до 0,01—0,001° применяются главным образом при зимних исследованиях. Сюда относятся ртутные *микротермометры* со шкалой от —1° до +1° (деления через 0,01°), *термопары* (спаи разнородных металлов, чаще всего меди и константана) и электрические *термометры сопротивления*.

Кроме температуры, в зависимости от целей исследований могут наблюдаться еще следующие физические свойства воды:

1) прозрачность,
2) цвет,
3) запах,
4) вкус.

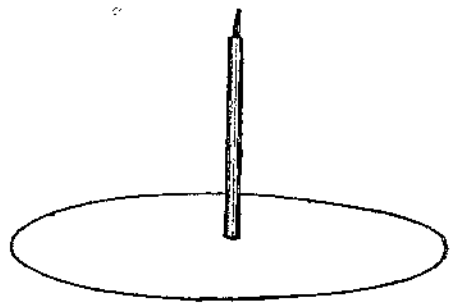


Рис. 295. Диск Секки.

Прозрачность речной воды чаще всего определяется на-глаз: поместив в сосуд из совершенно прозрачного стекла против света воду, только что взятую из реки, ее характеризуют следующей оценкой:

вода прозрачна,
едва заметная муть,
слабая муть,
значительная муть,
сильная муть,
очень сильная муть.

Для количественной характеристики прозрачности озерной и морской воды (а иногда и речной) применяется *диск Секки* (рис. 295), представляющий плоский круг из оцинкованного железа, диаметром 30 *см*, окрашенный белой эмалевой краской. В центре диска для подвешивания его на тросе укреплена короткая трубка, а для работы при сильном течении к нижней стороне диска прикрепляется съемный чугунный груз.

При производстве наблюдений диск медленно погружается в воду, причем мерой прозрачности служит глубина, на которой он исчезает. После этого начинают поднимать диск и замечают глубину, на которой он снова становится видимым. Среднее из двух наблюдений (в *м*) и принимается за величину прозрачности.

Цвет воды определяется, поместив воду в стеклянный цилиндр, высотой не менее 40 *см*, и смотря через слой воды сверху вниз на белую хорошо освещенную бумагу. Чтобы не мешал боковой свет, стенки цилиндра обертываются черной

бумагой, а для сравнения ставят рядом такой же цилиндр с дестиллированной водой. Если вода мутная, то ее предварительно фильтруют.

Для определения цвета озерной и морской воды употребляется шкала *Фореля-Уле*, представляющая спектр цветов, получаемых смешением голубой жидкости с желтой, и зеленой с коричневой в определенных пропорциях. Всего имеется 21 номер жидкостей, которые наливаются в стеклянные трубочки, затем запаиваемые. Набор их может помещаться в складном футляре, и наблюдатель подбирает номер, наиболее подходящий по цвету к исследуемой воде. При этом под трубочки подкладывается черный фон, а воду наблюдают на естественном фоне больших глубин.

Вкус воды определяется при температуре 15—20° Ц. Доброкачественная вода должна быть приятного освежающего вкуса и не должна иметь привкуса, обусловленного значительным содержанием солей и других примесей.

Для определения *запаха* воду нагревают до 40—60°, взбалтывают и нюхают. Может обнаружиться запах сероводорода или гнилостный запах. Последний можно выделить, если прибавить к воде немного раствора медного купороса, который связывает сероводород. Тогда гнилостный запах, если он есть, станет более явственным. Вода с значительным содержанием органических веществ обладает болотным запахом.

Химическое исследование воды, включая определение количества растворенных наносов (солей), особенно важно в вопросах водоснабжения и орошения. В него входит определение реакции воды, плотного сухого остатка и его состава, примесей и жесткости воды.

Для исследования употребляется хорошо профильтрованная вода, причем под чистой водой обыкновенно разумеется вода, не содержащая примесей органического происхождения и продуктов распада, независимо от степени ее минерализации, т. е. содержания растворенных солей. Значительное количество последних выражается большой величиной плотного остатка при выпаривании, высокой степенью жесткости и особым вкусом воды.

Реакция воды определяется чувствительными лакмусовыми бумажками. Исследуемая вода наливается в две чистые пробирки, в которые погружаются до половины полоски красной и синей лакмусовой бумаги. Покраснение синей бумаги покажет кислотность воды, посинение же красной — щелочный характер. Если цвет бумажек не меняется, то вода имеет нейтральный характер.

Плотным сухим остатком называется остаток после выпаривания воды и высушивания выделенных таким образом твердых веществ. Он дает общее количество растворенных солей и органических веществ. Последние могут быть удалены из него путем прокаливания, т. е. нагревания до высокой температуры.

Определение состава воды и растворенных солей производится методами лабораторного химического анализа, при котором выделяются различные элементы и соединения (например, калий, кальций, магний, хлор, азотистая и серная кислоты и пр.).

Жесткость обыкновенных питьевых вод зависит главным образом от присутствия солей кальция и магния и разделяется на жесткость общую и постоянную. Первая есть жесткость сырой воды, вторая — прокипяченной, в которой некоторые соли уже разложились и осели. Разница между общей и постоянной жесткостью есть *временная* или *устранимая* жесткость.

Жесткость выражается в градусах (немецких, английских, французских). Немецкий градус жесткости соответствует содержанию 1 сантиграмма окиси кальция на литр воды (количество окиси магния при этом перечисляется в соответствующее ему количество окиси кальция) и равен 1,25 английского градуса или 1,79 французского. Определение жесткости производится по способу *Клярка* путем титрования воды спиртовым раствором мыла, причем реакция считается законченной, когда появляется неисчезающая пузырчатая пена. По числу израсходованных до этого момента кубических сантиметров мыльного раствора на 100 $см^3$ воды и определяется жесткость из специальных таблиц.

Вода, предназначенная для питья, подвергается сверх того *бактериологическому* и *биологическому* исследованию.

§ 75. Наблюдения над зимним режимом. Наблюдения над зимним состоянием рек и водоемов, в связи с образованием в них льда, должны охватывать три периода:

1) период замерзания,

2) период существования ледяного покрова,
3) » вскрытия.

Эти наблюдения ведутся обычно на водомерных постах параллельно с наблюдениями над уровнем воды. Для более широкого изучения зимнего режима организуются специальные исследования, охватывающие участки значительного протяжения и включающие измерение расходов воды, наблюдения над донным льдом, полыньями, заторами и зажорами и т. д.

Зимние наблюдения на водомерных постах производятся в те же сроки, что и наблюдения над уровнем. По инструкции Государственного гидрологического института в период замерзания и те и другие наблюдения следует производить три раза в день (в обычные сроки), а при понижении температуры воды до 3° Ц следует вести регулярные наблюдения и над температурой воды и воздуха.

Состояние реки отмечается следующими записями:

1) «появились забереги» — когда поверхность воды замерзла у берегов;

2) «сало» — когда плывущие пластинки льда, смерзаясь друг с другом, делаются видимыми, или же плывут на поверхности воды комья от выпавшего снега или рыхлого донного льда (шуга);

3) «ледоход» — когда на реке появляются отдельные льдины; при этом указывается, какую часть реки занимает ледоход, например: ледоход сплошной, посередине реки, у такого-то берега;

4) «чисто» — если в момент наблюдения не было видно льда;

5) «река встала» — если река покрылась неподвижным льдом;

6) «образовался затор» — если вблизи поста произошла закупорка живого сечения льдом; при этом отмечается: а) место, где образовался затор, б) время, когда образовался, в) приблизительная длина участка реки, занимаемого ледяной массой, г) последствия, вызванные затором, д) время, когда затор прорвался; во время затора необходимо наблюдать уровень воды возможно чаще, не менее 5 раз в день, стараясь уловить наивысший уровень;

7) «река встала окончательно» — с записью времени, когда установилось по льду пешее и конное сообщение.

После окончательного замерзания производятся *наблюдения над ледяным покровом:*

1) измерение толщины льда,
2) наблюдения над трещинами в ледяном покрове,
3) наблюдения над полыньями.

Толщина льда измеряется через 5—7 дней в двух лунках (прорубях): у берега (близ поста) и около середины реки. По инструкции Государственного гидрологического института лунки пробиваются каждый раз на новом месте, и притом в таком, где сохранился нетронутым снеговой покров. В отличие от этого, лунки иногда делаются постоянными на весь зимний период, следя лишь за тем, чтобы снег около них оставался несмятым.[1]

Первый способ обеспечивает существование нетронутого снегового покрова и допускает употребление простейшей *ледомерной рейки*

[1] Снег, вследствие малой теплопроводности, предохраняет лед от быстрого увеличения его толщины.

(см. ниже), второй исключает возможность получения не совсем сравнимых данных, которые могут быть следствием разных условий течения в разных местах реки, но требует применения специальной ледомерной рейки.

Лункам в плане придается продолговатое очертание вдоль по течению и такие размеры, чтобы только можно было потрузить рейку. Если устраиваются постоянные лунки на свайном посту, то первую лунку прорубают в нескольких шагах выше или ниже по течению от наиболее глубоко забитой сваи, а другую — против нее посередине реки. На реечном посту первая лунка располагается в нескольких шагах против постовой рейки, вторая — против нее. Если лунки прорубаются всякий раз новые, то необходимо отмечать их расстояния от

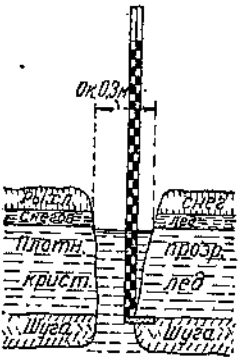


Рис. 296. Простая ледомерная рейка.

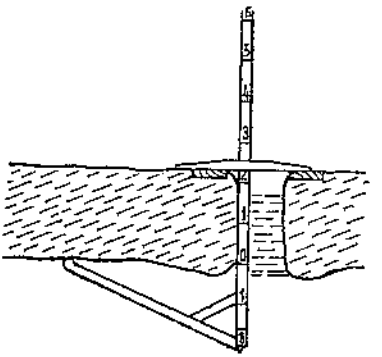


Рис. 297. Ледомерная рейка с подкосом.

берега и вверх или вниз по течению от поперечного профиля, в котором находится пост.

Измерение толщины льда делается каждый раз обязательно в обеих лунках.

Ледомерные рейки употребляются двух родов:

а) обыкновенная рейка с короткой поперечной планкой на нижнем конце (рис. 296),

б) специальная ледомерная рейка (рис. 297) для измерений в постоянных лунках.

При работе с последней подкос длиной до 1 м подводится под лед, рейка прислоняется к краю проруби и передвижная поперечная планка опускается на поверхность льда. Для удобства работы лучше по сторонам проруби вморозить вровень с поверхностью льда две дощечки, как показано на рис. 297. Конец подкоса закруглен и его высшая точка находится на горизонте нуля рейки, когда последняя вертикальна.

Такая рейка необходима для измерения толщины льда в постоянных лунках потому, что в них с течением времени лед у краев обыкновенно утолщается.

Когда рейка установлена, необходимо сделать отсчеты:

а) против верхней поверхности ледяного покрова (снегового льда),

б) против границы между снеговым льдом и плотным прозрачным льдом (см. рис. 296),

в) на уровне воды.

Из первых двух отсчетов определяется общая толщина льда, а также толщина льда кристаллического и снегового в отдельности. Уровень воды в проруби может быть: а) ниже нижней поверхности льда, б) выше ее, но ниже верхней поверхности и в) выше верхней поверхности, что также должно быть ясно из записей.

Кроме того необходимо отметить:

а) толщину несмятого снегового покрова в нескольких пунктах по ширине вдоль реки;

б) толщину шуги (донного льда), если таковая имеется (рис. 296), при помощи той же рейки. Это возможно сделать, так как плотность шуги вполне достаточна, чтобы почувствовать, когда рейка встретит шугу. Тогда, прочитав показание рейки на поверхности льда, надо вычесть из него толщину плотного ледяного покрова — это и будет толщина шуги;

в) характер верхней и нижней поверхностей льда (гладкая, шероховатая, очень неровная);

г) скорость течения в лунке (нет течения, слабое, среднее, быстрое);

д) глубину воды в лунках (от поверхности воды до дна) для небольших рек обязательно, для больших — если это возможно.

Наконец, желательно после ледостава, а также в середине и конце зимы вырубить недалеко от водомерного поста по куску льда для определения и детального описания его слоистости и вида нижней поверхности.

Перед *вскрытием* реки отмечаются:

а) потемнение ледяного покрова,

б) вспучивание льда,

в) появление проталин у берегов,

г) переход плотного льда в рыхлое состояние.

С начала весенней прибыли воды желательно снова возобновить более частые наблюдения над уровнем (не менее трех раз в день), причем необходимо уловить самый высокий уровень и время его наступления.

Моменты, сопровождающие вскрытие, отмечаются так:

1) «подвижка льда» (первая, вторая и т. д.) — с указанием часа; чтобы заметить подвижки, можно устанавливать на льду вехи, по передвижению которых относительно берега легко узнать, что произошла подвижка;

2) «лед тронулся» — когда лед начал двигаться сплошной массой;

3) «полный ледоход» — когда движется лед, разбившийся на льдины, при этом указывается, движутся ли отдельные ледяные поля, крупные или мелкие льдины;

4) «редкий лед» — обычно в конце ледохода;

5) «лед растаял на месте» — если ледохода не было;

6) в случае образования во время ледохода заторов, указывается: а) место, где образовался затор, б) время его образования, в) приблизительная длина участка реки, занятого ледяной массой, г) последствия, вызванные затором, д) время, когда затор прорвался;

7) «река очистилась» или «чисто» — когда наблюдатель не видит на реке льда.

Разумеется, порядок и состав перечисленных наблюдений в основном сохраняются и при наблюдениях над зимним режимом озер и водоемов со стоячей водой.

Сверх этих обычных наблюдений могут производиться специальные наблюдения над внутриводным льдом, которые ведутся только на гидрологических станциях или при специальных исследованиях.

Внутриводный лед — плывущий или отложившийся под ледяным покровом (шуга), и донный (прикрепленный к дну) образуется в связи с переохлаждением воды, когда температура ее понизилась немного ниже нуля благодаря соприкосновению водной поверхности с морозным воздухом и турбулентному движению. Особенно часто донный лед образуется на участках с быстрым течением (например в порогах), которое задерживает установление ледяного покрова, и в долго незамерзающих полыньях.

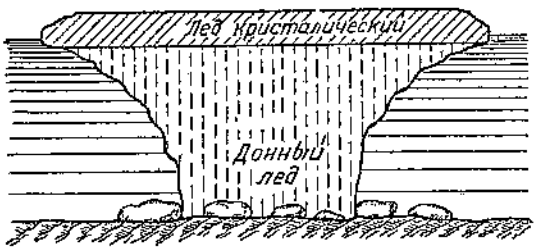


Рис. 298. Схема пятры на р. Волхове.

Представляя собой твердую ледяную кору или чаще губчатую или кашеобразную массу, примерзающую к дну, донный лед более похож на пропитанный водой снег, чем на обыкновенный плотный лед. Он отличается непрозрачностью и легкостью и в большинстве случаев содержит посторонние примеси, песок, камни и грязь, имеющиеся на дне.

Когда донный лед нарастает в достаточном количестве, он отрывается и всплывает благодаря своей легкости, а набиваясь под поверхностный лед ниже по течению, вызывает закупорку русла и *зажоры*, т. е. тот же эффект, что и заторы поверхностного льда.

Всплывший донный лед носит разные местные названия — шуги, шороха и т. п.

Нередко на порожистых реках наблюдается выпрастание со дна целых «ледяных островов», которые на реке Волхове, например, получили местное название *пятр* (рис. 298).

По инструкции Государственного гидрологического института простейшие стационарные наблюдения над донным льдом должны заключаться в следующем:

1) поздней осенью, при понижении температуры воды до 0°, необходимо начать тщательно наблюдать за рекой, осматривая дно с лодки при прозрачной воде и исследуя его веслом или шестом, если вода мутная; при этом от ударов донный лед может всплыть; кроме того, нужно опускать на дно на ночь камни с привязанными к ним ветками, которые в случае образования льда должны обмерзнуть;

2) нужно отметить время, когда и в каких местах был обнаружен донный лед и шуга;

3) описать характер и вид донного льда, указывая для него местные названия;

4) указать приблизительно глубину реки и скорость течения в местах образования льда;

5) описать дно реки в этих местах (каменистое, песчаное, ямы, водоросли и т. п.);

6) произвести, в случае наличия внутриводного льда, наблюдения над прозрач-

ностью воды и облачностью. Прозрачность воды может быть определена при неимении диска *Сечки* белой тарелкой, подвешенной плашмя на веревке, а облачность оценивается глазомерно баллами от 0 до 10, смотря по тому, какая часть неба в десятых долях покрыта облаками. (Например, облачность «3 балла» обозначает, что $^3/_{10}$ неба покрыто облаками или тучами). Облачность должна отмечаться не менее трех раз в день.

Иногда ведутся специальные наблюдения над внутриводным льдом при помощи *металлических сеток*. С этой целью к достаточно длинной веревке (в зависимости от глубины в данном месте) прикрепляются сетки цилиндрической формы (железные или медные) на расстоянии около метра друг от друга. К концу веревки прикре-

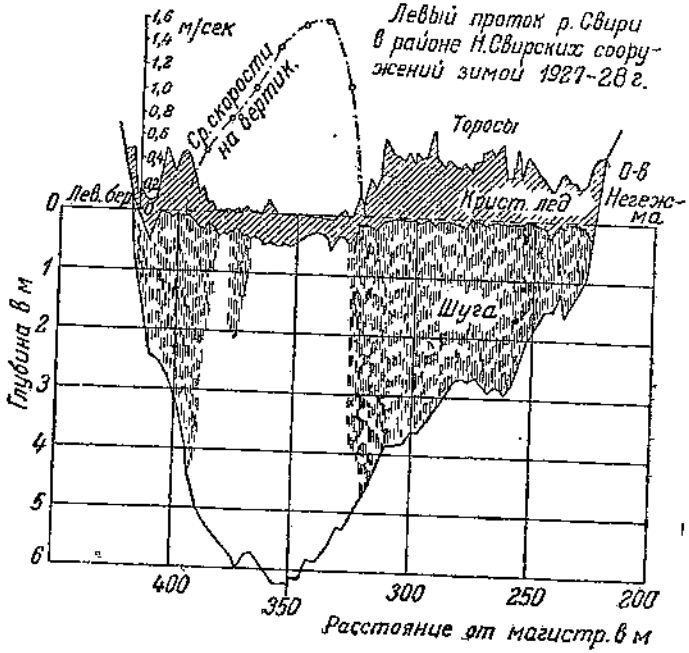


Рис. 299. Поперечный профиль, забитый шугой.

пляется груз и веревка опускается до дна, причем верхний конец ее закрепляется за кольшек. Такие веревки опускаются в разных местах и оставляются в воде до следующего дня.

Утром их вынимают и, в случае обнаружения на сетках льда, отмечают его количество, толщину и структуру (пластинчатый, зернистый, игольчатый или твердый лед).

Сетки опускаются в воду в более глубоких местах у берега (с пристани, с края заберегов) или у нижнего по течению конца достаточно большой полыньи.

Более широкие *маршрутные* наблюдения над зимним режимом могут охватывать значительные по площади участки и заключаться в периодических объездах их с нанесением на план полыней, мест образования заторов и зажоров, измерении в разных местах тол-

щины льда и снегового покрова, составлении поперечных профилей, наблюдениях над температурой воды и воздуха, наблюдениях над колебаниями уровня воды и расходами и т. п.

Иногда шуга забивает почти все живое сечение потока, оставляя незначительные проходы для воды (рис. 299). Толщина ее измеряется при промерах наметкой с двумя крестообразно прикрепленными планками (рис. 300-*a*), которая легко проходит через губчатую массу льда и в то же время позволяет почувствовать при подъеме момент прикосновения планок к нижней поверхности шуги.

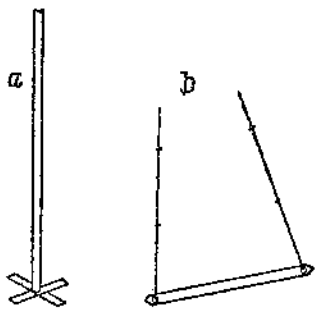


Рис. 300. Приспособления для измерения толщины шуги.

С той же целью может применяться другой простой прибор, состоящий из железного стержня (рис. 300-*b*) длиной около 1 *м* и весом до 10 *кг*, к концам которого прикреплены тросы. Стержень опускается в вертикальном положении и легко проходит слой шуги, затем его приводят в горизонтальное положение, подтягивая второй трос, и таким образом нащупывают нижнюю поверхность шуги. Отсчет делается по разметкам на тросе.

Часть воды фильтрует через шугу, и ее при измерении расхода потока учесть затруднительно. Это вносит некоторую не поддающуюся определению ошибку в измерения.

ПЕРЕЧЕНЬ ГЛАВНЕЙШИХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамович Д. И., Исследование наносов реки Сулак, Ленинград, 1935.
2. Аполлов Б. А. и Лукашин М. А., Практическая гидрометрия твердого расхода потоков, Тифлис, 1929.
3. Аполлов Б. А. и Лукашин М. А., Гидрометрия, Тифлис, 1932.
4. Архиепископов Н. А., Водомерные посты, СПБ, 1909—10.
5. Басин М. М., Гидрометрия и основы гидрологии, Ленинград, 1936.
6. Белкова Е. Н., Инструкция по гидрометрическим исследованиям в связи с мелиоративными работами, Москва, 1930.
7. Борнадский Н. М. и Юрков А. О., Материалы по вопросу о применении химического метода к измерению расхода воды, СПБ, 1914.
8. Близняк Е. В., Производство исследований рек, озер и водоразделов, Москва, 1936.
9. Бочков Н. М., Гидрометрическая вертушка, Москва, 1934.
10. Быдин Ф. С. Зимний режим рек и методы его изучения, Ленинград, 1933.
11. Бюллетени Гидрометрической части в Туркестанском крае, Ташкент, 1917.
12. Вальман В. Н., Гидролого-гидрометрические исследования в бассейне р. Волхова, Материалы по исследованию р. Волхова и его бассейна, вып. VI, Ленинград, 1926.
13. Великанов М. А., Гидрология суши, Москва, 1932.
14. Владычанский В. И., Гидрометрия, Ташкент, 1924.
15. Временная инструкция по устройству гидрометрических станций и постов и ведению работ на них, Труды Средне-Азиатского Опытно-Исследовательского института водного хозяйства, Ташкент, 1930.
16. Гельфер А. А., Инженерная гидрогеология, Ленинград, 1931.
17. Гириллович Н. А., Гидрометрия, Ленинград, 1933.
18. Гончаров В. Н., Движение наносов по дну, Новочеркасск, 1929.
19. Гришин М. М., Гидротехнические изыскания, Новочеркасск, 1927.
20. Записки Гос. Гидрологического института, Ленинград, 1926—1935.
21. Зиринг А. А., Описание работ по определению расходов воды р. Енисея у Красноярска в 1911 г., Материалы для описания русских рек, вып. 33, СПБ, 1913.
22. Зунтуридн И. и Риненберг Х., Исследование зависимости между расходами и глубинами в речных потоках, Тифлис, 1928.
23. Известия Гос. Гидрологического института, Ленинград, 1921—1934.
24. Известия Научно-исследовательского института гидротехники, Ленинград, 1931—1937.
25. Известия Научно-мелиорационного института, Ленинград, 1921—1931.
26. Измерение расходов воды химическим методом, Ежегодник СПБ Округа П. С. за 1913 г.
27. Инструкции Гидрометрической части в Европейской России, Петроград, 1915.
28. Инструкции Гос. Гидрологического института (водомерная, по определению расхода воды вертушкой, обработке расхода воды, построению кривой расходов, организации гидрологических станций и др.).
29. Инструкция для производства работ на постоянных гидрометрических станциях, Управление внутренних водных путей и шоссейных дорог, СПБ, 1914.
30. Инструкция для наблюдения уровня воды, НКПС, Москва, 1925.
31. Инструкция по водноэнергетическим изысканиям, ч. II. Гидрологические работы, Гидроэлектропроект, Москва, 1934.

32. Иогансон Е. И., Зимний режим р. Волхова и оз. Ильмень, Материалы по исследованию р. Волхова и его бассейна, вып. XIV, Ленинград, 1927.
33. Калинович В. Ю., Гидрометрические работы на реках Ильменского бассейна за 1923—25 г., Материалы по исследованию р. Волхова и его бассейна, вып. XIII, Ленинград, 1926.
34. Каталоги фирм: Амслера, Ганзера, Гаслера, Герлей, Отта, Фюсса и др.
35. Колушайло С. И., Гидрометрия, Москва, 1918.
36. Крылов А. И., Гидрометрия, Казань, 1918.
37. Материалы, издаваемые Управлением гидрометрической части Европейской России, Петроград, 1915.
38. Материалы к инструкциям по исследованию водных путей, СПБ.
39. Материалы по гидрометрии рек Средней Азии, Средне-Азиатский Опытно-исследовательский институт водного хозяйства, Серия Ж (гидрометрия), Ташкент, 1928—30.
40. Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР, Гидроэлектропроект.
41. Моисеенко С. И., Гидрометрические работы, Проект водного пути между Камой и Иртышем, Материалы для описания русских рек, вып. 61, СПБ, 1914.
42. Москвитинов И. И., Применение метода Гибсона, Ленинская Днепрогэс, 1935, № 1—2.
43. Москвитинов И. И. и Рахманов А. Н., Инструкция для производства некоторых гидравлических исследований на ирригационных системах, Ленинград, 1926.
44. Огиевский А. В., Производство основных гидрометрических работ, Киев, 1930.
45. Огиевский А. В., Гидрометрия и производство гидрометрических работ, Москва, 1934.
46. Огиевский А. В. и Оппоков Е. В., Гидрометрия, Харьков—Киев, 1930.[1]
47. Отчеты Гидрометрической части в Туркестанском крае за 1910—14 г., СПБ.
48. Отчеты Гидрометрической части на Кавказе за 1910—13 г., Тифлис.
49. Павловский Н. Н., Гидравлический справочник, Ленинград, 1937.
50. Поляков В. В., Исследование стока взвешенных и донных наносов, Ленинград, 1935.
51. Производство портовых технических изысканий, Москва, 1931—1932.
52. Сборники Гидролого-Гидротехнического института НКПС (II и III), Москва, 1930.
53. Сборник инструкций для производства гидрометрических работ и наблюдений, Наркомзем УССР, Киев, 1925.
54. Сведения об уровне воды на внутренних водных путях (изд. Мин. Путей сообщения и Гос. Гидрологического института).
55. Соколов Н. Н., Водный режим рек Волжского бассейна, Казань, 1923.
56. Соколов Н. Н., Наблюдения над проходом весенних вод в 1912 г. на Нижнем Дону, Казань, 1915.
57. Справочники по водным ресурсам СССР (изд. ГУГМС).
58. Таблицы поправок глубин на относ троса, ЕГМС, Ленинград, 1935.
59. Троицкий А. П., Методы перехода от уровня воды к расходам и их оценка. Бюллетень Научно-Гидротехнического кружка, 1926, № 3—4, Новочеркасск.
60. Труды I и II Гидрологических съездов, Ленинград, 1925 и 1929.
61. Труды Гос. Гидрологического института (изд. ГУГМС).
62. Труды IV Балтийской гидрологической конференции, Ленинград, 1933.
63. Флерова Р. А., Производство зимних наблюдений на гидрометрических пунктах, Ленинград, 1932.
64. Флерова Р. А., Основные методы подсчета зимнего стока рек, Исследования рек СССР, вып. VII, Ленинград, 1935.
65. Шафалович А. В. и Фидман А. И., Описание гидрометрических работ при исследованиях р. Зеи в 1907—09 г., Материалы для описания русских рек, вып. 34, СПБ, 1912.
66. Шестопал О. С., Гидрология и гидрометрия, Москва, 1933.
67. Шокальский Ю. М., Океанография, Петроград, 1917.

[1] На украинском языке.

68. Шпиндлер И. Б., Гидрология моря, Петроград, 1915.
69. Allen C. M. and Taylor E. A., The Salt Velocity Method of Water Measurement, Trans. Am. Soc. Mech. Eng., 1923, Vol. 14.
70. Canaan H. F., Wassermessungen bei Grosskraftanlagen, München, 1930.
71. Hoyt J. C. and Grover N. C., River Discharge, New-Jork, 1921.
72. Jasmund R., Fliessende Gewässer, Handbuch der Jngenieur-Wissenschaften, III, Teil, 1. Bd., II Kap., Leipzig, 1923.
73. Kirschmer O., Das Salzverdünnungsverfahren für Wassermessungen, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1931, Heft 18.
74. Kirschmer O. und Esterer B., Die Genauigkeit einiger Wassermessverfahren, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1930, Bd. 74.
75. Kolupaila, S., Die Berechnung der Winterabflussmengen, Tallin, 1928.
76. Kolupaila S., Flügelprüfanstalt bei Kaunas und derer Arbeitsmethoden, Tallin, 1928.
77. Kolupaila S., Über die Verteilung der Geschwindigkeiten auf der Lotrechten des Stromes, III Hydrologische Konferenz der Baltischen Staaten, Warszawa, 1930.
78. Liddel W. A., Stream Gaging, New-Jork, 1927.
79. Mettler H., Probleme und Konstruktionen aus der Hydrometrie, Zürich, 1927.
80. Ott. A., Theorie und Konstantenbestimmung der hydrometrischen Flügel, Berlin, 1925.

ТЕХНИЧЕСКИЙ СПИСОК

водомерного поста

А.—При составлении технического списка обязательно должны быть заполнены пп. 1—35.

Б.—Ведомости пп. 36 и 37 заполняются постепенно при обнаружении или исправлении повреждений и при поверках постов.

1. Река (канал, озеро) _____
2. Республика, область _____ Район _____
   Сельсовет [1] _____ Селение [1] _____
3. Почтовая контора в гор., селе _____ в _____ *км*
4. Телеграфная контора в гор., селе _____ в _____ *км*
5. Железнодорожная станция или пристань _____ в _____ *км*
6. Ближайшее селение (город) _____ в _____ *км*

   Сообщение поста с ними по какой дороге _____ _____ _____ _____

7. АДРЕС: почтовый _____
   „ телеграфный _____
8. Фамилия, имя и отчество наблюдателя _____
   _____
   Род занятий _____; расстояние от его жилища до поста _____
9. Пост открыт _____ числа _____ месяца _____ года
   (кем) _____ Находится в ведении _____
10. Время работы поста в течение года (круглый год, во время свободное от льда и т. п.) _____
11. Время ежедневных наблюдений: летом _____
    зимой _____
12. Цель устройства поста _____
    _____
13. Положение поста относительно притоков, островов, перекатов, порогов _____
    _____
    оросительных, осушительных или судоходных каналов _____
    _____
    плотин, шлюзов, набережных, мостов, проезжих и других дорог _____
    _____
14. Координаты поста: широта _____ долгота _____
    по карте издания _____ в масштабе _____ 19____ года
15. Расстояние поста от устья реки _____ *км* по карте издания _____
    _____ в масштабе 19____ года
16. Бассейн реки от верховья до поста _____ *кв. км* по карте издания _____
    _____ в масштабе _____ 19____ года.
17. Правый берег: высокий, пологий, крутой, обрывистый, низкий, заливаемый высокими водами, чистый, покрытый лесом, кустарником, камышом, травой, размываемый, наносный _____
    _____

[1] Необходимо указать как новое, так и старое название.

18. Левый берег: высокий, пологий, крутой, обрывистый, низкий, заливаемый высокими водами, чистый, покрытый лесом, кустарником, камышом, травой, размываемый, наносный ———

19. Ложе реки: скалистое, гравелистое, песчаное, илистое, торфянистое, чистое, заросшее, переменное ———

20. Число рукавов при низкой воде ——— при высокой ———
——— их краткая характеристика ———

21. Ширина реки при низкой воде ——— *м*, при высокой ——— *м*, главное течение под ——— берегом, посередине, быстрое, медленное ———

22. Заторы льда: бывают (где) ———

23. Сопутствующие им явления ———

24. Производились ли изыскания на данном участке, вблизи его ———
(подробные сведения поместить в конце техн. списка).

25. Пост расположен на правом, левом берегу (реки, канала), на сев., южн., зап., вост. берегу (озера) ———

26. Пост реечного, свайного, смешанного типа ———

27. Описание переносной рейки, помощью которой производится измерение горизонтов воды на сваях (материал, длина, поперечные размеры, окована ли снизу, способ обозначения ,[1] в каких мерах деления) ———

28. Замечания относительно условий, которые могут вредить существованию поста, измерениям горизонтов, уклонов, расходов, например: плывущие суда, плоты, ледоход, заторы и навалка льда, подмыв берега, размываемость дна, отложение наносов, постоянные и временные сооружения, мостовые опоры, плотины, дамбы, набережные, работа мельниц (пропуски и задерживание воды), впадающие притоки или ———

29. РЕПЕРЫ ПОСТА

№№	Материал	Способ установки	Условная отметка *м*	Абсолютная отметка *м*	Высота над нулем поста *м*	С какого времени существ.	Примечания

За нуль поста принимается условная плоскость, назначаемая ниже возможного наинизшего уровня воды в створе поста.

30. Чертежи реперов поста, с указанием на них мест для установки рейки и надписей и размеров реперов.

[1] Деления накрашены, вырезаны, набиты из жести и т. д.

31. Схематический профиль поста, с показанием размеров вертикальных и горизонтальных. Обязательно должны быть показаны реперы, сваи, рейки, горизонт воды в день и час составления описания, отметки реперов, головок свай и нулевых делений реек над нулем поста, номера и горизонтальные расстояния между реперами, сваями и рейками (в *м*).

32. Схематический поперечный профиль реки по створу поста с показанием горизонтальных расстояний от репера (или верхней сваи-репера) и условных отметок профиля относительно той же точки. Обязательно должны быть показаны: принятая для нивелировки (ватерпасовки) отметка репера (или сваи-репера) и отметка горизонта воды в день и час составления описания (размеры в *м*).

33. Схематический план участка реки в районе расположения вод. поста [1] с показанием направления магнитной стрелки, свай поста, реек, реперов, притоков, селений и прочих местных предметов.

34. ОПИСАНИЕ СВАЙ.

№№ свай	Расстояние от репера	Материал	Длина *м*	Поперечные размеры *см*	Глубина под землей *м*	Способ установки [2]	Способ укрепления головки [3] сваи	Условная отметка *м*	Высота над нулем поста	Примечание

35. ОПИСАНИЕ РЕЕК. [4]

№№ реек	Материал	Длина *м*	Поперечные размеры *см*	Способ обозначения	В каких мерах деления	К чему и как прикреплена рейка	Условные отметки нуля рейки *м*	Высота нуля рейки над нулем поста *м*

Описание составил———————— (когда) ————————

[1] Длина показываемого на плане участка должна быть не менее 5-кратной ширины реки.

[2] Забита, закопана, завинчена.

[3] Головка окована железом (колпак), забит гвоздь с широкой шляпкой.

[4] Дополнения к описанию реек могут быть помещены в конце техн. списка

36. СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕНЕНИИ И ЗАМЕНЕ СВАЙ И РЕЕК.

№ сваи или рейки	Повреждения			Исправления		
	Число, месяц и год	Высота над нулем поста до повреждения *м*	Описание повреждений	Число, месяц и год	Высота над нулем поста после починки *м*	Описание исправления

37. ВЕДОМОСТЬ

отметок свай и нулей реек над нулем поста, полученных в результате поверок поста.

№ сваи или рейки	Отметки свай и нулей реек над нулем поста *м*								
	Д а т а п о в е р о к								

Примечания и дополнения.

ПОЛЕВАЯ КНИЖКА

для одноурочных наблюдений

на $\frac{\text{речной}}{\text{озерной}}$ станции

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА

Союза С. С. Р.

№	Тип	Разряд	Место для штампа Районного Бюро
Месяц		Год	

Название реки (озера)	На каком берегу

Местоположение станции

Фамилия, имя и отчество наблюдателя

Число	ПОВРЕЖДЕНИЯ		Дата ремонта
	Наименование	Описание повреждения	

ОТМЕТКИ ИНСПЕКТОРОВ И ТЕХНИКОВ

	Число	Результат	Расписка
Инспекция			
Ремонт водомерного поста и оборудования станции			
Нивелировка водопоста			
Промер по створу поста			

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Вид наблюдений \ Дата		1-го	11-го	21-го
Водная растительность				
Ледяной покров на середине реки	Поверхность ледяного покрова			
	Толщина снегового покрова в *см*			
	Толщина льда в *см*			
	Толщина шуги под льдом в *см*			
	Структура льда			
	Глубина воды в лунке в *см*			
	Уровень воды в лунке (от верхн. кромки льда) в *см*			

№ и дата взятия пробы для химического анализа

№ и дата взятия пробы для гидробиологического анализа

Различные явления (проход судов и сплав, переход и проезд по льду, разрушения берегов при паводках и ледоходе и др.).

Отметки о производстве сверхсрочных наблюдений

Подпись наблюдателя	Дата отправки на почту	Форма С—1

Число	Уровень воды					Температура воды	Мутность (прозрачность)	Волнение	Погода	Сведения о вскрытии, замерзании, ледоходе, ледоставе, заторах, зажорах, донном льде и о других явлениях
	№ сван	Отсчет по рейке	№ сван	Отсчет по рейке	В принятых отметках					
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										

20 Зак. 2254. Н. А. Гаврилович.

14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											
31											

Если в исключительных случаях уровень можно отсчитать только вниз по свае, то перед отсчетом поставить знак —.

Наблюдения производились в _____ часов.

Приложение 3
(Лицевая сторона талона)

Талон годового журнала		Местоположение	Месяц	Год
№ станции	Название реки (озера)		Наблюдения производились раз в сутки в ——— часов	

Число	Уровень воды					Температура воды	Мутность (прозрачность)	Волнение	Погода	Сведения о вскрытии, замерзании, ледоходе, ледоставе, заторах, зажорах, донном льде и о различных других явлениях
	№ сваи	Отсчет по рейке	№ сваи	Отсчет по рейке	В принятых отметках					
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										

12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31

(Оборотная сторона талона)

Периодические наблюдения

Вид наблюдений \ Дата	1-го	11-го	21-го
Водная растительность			
Ледяной покров на середине реки — Поверхность ледяного покрова			
Ледяной покров на середине реки — Толщина снегового покрова в *см*			
Ледяной покров на середине реки — Толщина льда в *см*			
Ледяной покров на середине реки — Толщина шуги под льдом в *см*			
Ледяной покров на середине реки — Структура льда			
Ледяной покров на середине реки — Глубина воды в лунке в *см*			
Ледяной покров на середине реки — Уровень воды в лунке (от верхней кромки льда) в *см*			
№ и дата взятия пробы для химического анализа			
№ и дата взятия пробы для гидробиологического анализа			

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА СОЮЗА С. С. Р.

Место для штампа Районного Бюро

ОТМЕТКИ СВАЙ

№№ свай	Дата нивелировок „.....“.....мес.	„.....“.....мес.

Разные явления (проход судов и сплав, переход и проезд по льду, разрушения берегов при наводках или ледоходе и др.).

Отметка о производстве сверхсрочных наблюдений

Повреждения			Дата ремонта
Число	Наименование	Описание повреждения	

Подпись наблюдателя

Форма С—3

609

.....год

Водомерный пост №.....

р. Волга, г. Куйбышев (б. Самара), основ. в 1876 г. на левом берегу у Заводской улицы. Отм. нуля графика 15,149 *м* (усл.).

Мес.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Число	Высота уровня над нулем графика в сантиметрах											
1	288	215	134	70	655	1148	269	141	9	188	450	132
2	286	211	130	70	676	1135	243	147	6	196	442	137
3	286	209	128	70	700	1122	226	154	4	207	435	139
4	284	205	126	73	725	1107	207	158	2	213	429	137
5	284	201	124	73	749	1094	186	151	0	220	422	115
6	282	198	119	75	776	1080	165	143	—2	226	418	105
7	284	194	115	79	807	1053	154	137	—2	239	418	102
8	284	190	113	85	828	1039	147	126	2	247	418	96
9	284	188	109	92	847	1018	139	117	0	250	418	92
10	284	186	107	102	877	979	126	111	—2	256	422	83
11	284	181	105	117	900	947	115	107	—2	258	425	75
12	284	177	102	137	930	913	107	105	0	265	422	68
13	284	175	100	164	954	877	98	102	11	267	418	66
14	284	173	98	188	984	839	92	102	19	267	412	64
15	284	169	98	215	1009	804	85	105	28	267	403	60
16	284	166	96	241	1024	740	77	107	34	271	395	62
17	282	164	94	267	1043	689	70	109	41	290	386	66
18	280	162	92	284	1065	636	66	111	47	303	373	79
19	277	160	90	292	1084	585	62	113	55	316	356	85
20	273	158	87	307	1101	536	58	111	68	337	322	85
21	269	156	87	322	1116	493	58	111	83	356	297	79
22	265	154	85	339	1129	450	60	105	98	371	280	66
23	258	151	83	378	1137	416	62	92	111	390	258	45
24	254	147	83	476	1146	390	66	83	117	401	235	28
25	250	145	81	578	1154	371	73	77	126	412	213	21
26	243	143	81	518	1161	348	77	62	137	420	188	21
27	239	141	79	529	1163	331	85	55	147	427	171	21
28	235	139	77	568	1163	318	98	41	158	435	158	28
29	230	—	75	604	1163	303	111	32	171	437	145	45
30	224	—	73	632	1158	290	124	23	179	440	137	109
31	218	—	70	—	1154	—	134	15	—	446	—	183
Средн.	269	174	98	265	980	735	117	102	55	310	342	80
Низш.	218	139	70	70	655	290	58	15	—2	188	137	21
Выс.	288	215	134	632	1163	1148	269	158	179	446	450	183

Средний годовой уровень 294, наинизший —2, наивысший 1163.

У. С. С. Р.
НАРКОМЗЕМ

Отдел Мелиорации и Водного Хозяйства Упрмелиозема
Гидрометрическая часть
Гидрологический район

Приложение 5

Бланк для измерения расхода воды поплавками *(Лицевая сторона)*.

РАСХОД № .....

Измерен.....дня.....месяца 19.....г.

Нужное подчеркнуть

Состояние погоды и реки:
Погода: ясно, пасмурно, дождь, снег.
Ветер: нет, слабый, средний, сильный, весьма сильный.
Направление ветра: по течению, против, с правого берега, с левого берега.
Разрушаются берега: правый, левый, нет.
Ложе реки: скалистое, гравелистое, песчаное, илистое, глинистое, чистое, заросшее, переменное.
Степень мутности воды: чистая, слабомутная, сильно мутная, весьма мутная.
Мусор плывет: у берегов, по стрежню, мусора нет, мало, много, идет сало, лед.
Примечания:

Бассейн реки .....Река.....
Область .....Район.....
Рабочий створ №.....у.....
Ближайший водомерный пост №.....
Расстояние между крайними створами 40 *м*
Отм. репера № 1 на правом берегу 4,754 *м*
Отметка (на створе 4,21 *м* / над „0" гориз. воды (на вод. посту 3,82 *м*) / вод. поста)
Начало измер. 8 час. 30 мин. пополуд.
Конец измер. 1 час 45 мин. пополуд.
Ширина живого сечения $B = 23{,}59$ *м*
Наибольшая глубина $H_{max} = 2{,}07$ *м*
Площадь живого сечения $\Omega = 23{,}355$ *кв. м*
Переходной коэффициент $K' = 0{,}9$
Расход реки $Q = 18{,}422$ *м³/сек*
Средняя скорость $V = \frac{Q}{\Omega} = 0{,}79$ *м/сек*
Наибольшая поверхностная скорость $V_{max} = 1{,}00$ *м/сек*
Температура воды 2° Ц.
Температура воздуха 10° Ц.

ОТДЕЛ I

П о и л а в к и

№№ поплавков	Место прохода поплавков через створ: Верхний	Средний	Нижний	Длина средней траектории в м	Продолжительность хода	№№ групп	№№ поплавков	Место прохода поплавков через створ: Верхний	Средний	Нижний	Длина средней траектории в м	Продолжительность хода	№№ групп
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1		6,0		40,0	2′01″	1	17		22,8		40,0	46″	11
2		задержался			—	—	18		23,9		„	40″	11
3		7,0		„	1′33″	2	19		21,8		„	38″	11
4		8,1		„	1′19″	2	20		27,5		задержался	—	—
5		10,7		„	55″	4	21		18 8		„	43″	9
6		6,4		задержался	—	—	22		22,4		„	38″	11
7		10,0		„	59″	3	23		26,5		„	46″	13
8		12,2		„	50″	4	24		26,3		„	42″	13
9		12,0		„	46″	4	25		27,1		„	45″	13
10		14,3		„	44″	6	26		28,6		„	1′11″	14
11		17,3		„	41″	8	27		26,9		„	41″	13
12		19,2		„	37″	9	28		25,0		„	48″	12
13		1.,6		„	50″	7	29		13,1		„	52″	5
14		21,9		„	41″	11	30		28,2		„	1′23	14
15		19,6		„	40″	9	31		6,4		„	1′41″	1
16		20,9		„	43″	10	32						

Подпись измерявшего расход.....

ОТДЕЛ II Промеры					ОТДЕЛ III Вычисление расхода воды															
№№ промерных вертикалей—расстояние от реп. № 1 в м	Расстояние между промерами в м	Глубина вертикали в м			Распределение поплавков по группам		Расстояние скоростной вертикали от репера № 1 в м	Расстояние между смежными вертикалями в м	Глубина скоростной вертикали в м	№№ интервалов	Средняя глубина площадки в м	Площадь площадки в м²	Площадь между скоростными вертикалями в м²	Продолжительность ходаполупоплавков в сек.	Средняя для группы продолжительность ходаполупоплавков в сек.	Поверхностная скорость в м/сек	Полусумма смежных скоростей	Фиктивный расход в м³/сек
		I	II	Средняя	№№ поплавков	№№ групп												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
5,44		Урез прав. бер. 0,00														0,00		
	0,96				1	1	6,20	0,76	0,24	I	0,12	0,091	0,091	121	111	0,36	0,18	0,016
6,40		0,30	0,30	0,30	31			0,20			0,27	0,054		101				
	2,10									II			0,434				0,415	0,180
					3	2	7,55	1,15	0,36		0,33	0,380		93	86	0,47		
8,50		0,43	0,39	0,41	4			0,95			0,385	0,366		79				
	0,90									III			1,128				0,575	0,648
9,40		0,48	0,53	0,51				0,90			0,46	0,414						
	1,20					3	10,00	0,60	0,65		0,58	0,348						
10,60		0,76	0,83	0,79	7			0,60		IV	0,72	0,432		59	59	0,68		
	1,10				5								1,242	55			0,74	0,919
						4	11,60	1,00	0,83		0,81	0,810						
11,70		0,86	0,80	0,83				0,10			0,83	0,083			50	0,80		
	1,30													46				
					9					V				50			0,785	0,990
13,00		0,87	0,83	0,85	8			1,30			0,84	1,092	1,261					
	0,40							0,10			0,86	0,086						
13,40		0,90	0 92	0,91	29	5	13,10	0,30	0,87		0,89	0,267						
	1,60									VI			1,136	52	52	0,77	0,84	0,954

15,00		1,13	1,07	1,10	10	6	14,30	0,90	1,02		0,965	0,869									
	1,00							0,70		VII	1,06	0,742	1,408	44	44	0,91					
16,00		1,15	1,10	1,13	13	7	15,60	0,60	1,12		1,11	0,666					0,855	1,204			
	1,10							0,40			1,125	0,450		50	50	0,80					
17,10		1,72	1,76	1,74				1,10		VIII	1,435	1,579	2,380				0,89	2,118			
	1,40										1,755	0,351									
18,50		1,95	1,90	1,92	11	8	17,30	0,20	1,77		1,845	2,214		41	41	0,98					
	0,60							1,20		IX	1,995	1,197	3,618	43			0,99	3,582			
19,10		2,11	2,03	2,07	21			0,60													
	1,20				12						2,065	0,207			40	1,00					
20,30		1,92	1,94	1,93	15	9	19,20	0,10	2,06		1,995	2,195		37							
	1,00							1,10		X	1,775	1,065	3,260	41			0,965	3,146			
21,30		1,45	1,38	1,41	16	10	20,90	0,60	1,62		1,515	0,606		43	43	0,93					
	0,90				19			0,40													
22,20		1,41	1,34	1,38	14					XI	1,395	1,256	2,426	38			0,955	2,317			
	1,30							0,90						41							
					22			0,40			1,41	0,564			41	0,98					
23,50		1,55	1,57	1,56	17	11	22,60	0,90	1,44		1,50	1,350		38							
	0,90				18									46							
								0,90		XII				40							
24,40		1,40	1,37	1,39							1,475	1,328	3,425				0,905	3,100			
	2,30				28			0,60			1,245	0,747		48	48	0,83					
					24	12	25,00	1,70	1,10												
26,70		0,32	0,30	0,31	23	13	26,70		0,31	XIII	0,705	1,199	1,199	42			0,875	1,049			
	2,33													46	43,5	0,92					
					27					XIV				41							
					25						0,195	0,332	0,332	45			0,72	0,239			
29,03		Урез. лев. бер. 0,00			30	14	28,40	1,70	0,08												
					26			0,63		XV	0,04	0,025	0,025	83	77	0,52	0,26	0,007			
														71		0,00					

Ширина реки $B = 23{,}59$ м

$\Omega = 23{,}355$ м². Фиктивный расход $Q' = 20{,}409$ м³ в сек.
Действительный расход $Q = K' \; Q' = 18.422$ м³ в сек.

Подпись вычислявшего расход.....

Подпись поверявшего вычисления.....

Река ..... **Расход №** .....

Тетрадь №..... Определенный гидрометрическая станция или створ.

(См. ведомость полевых работ) „..... “ ..... 19 г.

Место определения расхода .....

Вертушка ..... № .....
Лопасть №.....
Работа с $\frac{\text{троса}}{\text{штанги}}$
Контакт через ..... оборотов
Метод наблюдений .....
Тарировка №..... „..... “ ..... 19 ..... г.

Секундомер фирмы ..... № .....
выверенный .....
„..... “ ..... 19 ..... г.

Описание и отметка ближайшего постоянного репера .....

Начало работ . . . . ч. ..... м.
Конец „ . . . . ч. ..... м.
Продолжит. работ . ..... ч. ..... м.

Изменение горизонта воды за время производства наблюдений:

на водом. посту правого берега ..... м
„ „ „ левого „ ..... м

Изменение площади живого сечения за время производства наблюдений:

в % к средней площади живого сечения ..... %

Расход при обработке отнесен к промеру „..... “ ..... 19 ..... года.

Принятые данные:

Горизонт воды на раб. профиле = ... м
Расходы воды . . . . . Q = ... $м^3/сек$
Площадь живн. сечения . Ω = ... $м^2$
Средняя скорость . . . . V = ... $м/сек$
Наибольшая скорость. V_{max} = ... $м/сек$
Ширина реки . . . . . B = ... м
Средняя глубина . . . . H = ... м
Число вертикалей . . . . N = ...

Для зимних наблюдений:

Средняя отметка нижней поверхности погруженного льда . . . = ... м
Средняя отметка нижней поверхности погруженной шуги . . . = ... м
Площадь погруженного льда = ... $м^2$
„ плотного „ . = ... $м^2$
Средняя толщина погруженного льда . . . . . = ... м
Средняя толщина погруженной шуги . . . . . = ... м
Средняя толщина плотного льда = ... м

Расход определял:

Расход обработал:

Заведывающий гидрометрической станцией

Подсчеты проверил:

Наблюдения над уклоном I

	Правый берег		Левый берег	
	Начальн.	Конечн.	Начальн.	Конечн.
Верхний вод. пост { № сваи/отсчет . .				
Верхний вод. пост { Горизонт воды .				
Нижний вод. пост { № сваи/отсчет . .				
Нижний вод. пост { Горизонт воды .				
Разность отметок				
Расстояние между постами				
Уклон I				

Обследование береговых участков реки

Правый берег	Левый берег
1. Расстояние от.....правого берега до уреза воды правого берега . . . . . =.....м	1. Расстояние от.....левого берега до уреза воды левого берега . . . . . =.....м
2. Расстояние от.....правого берега до уреза воды левого берега . . . . . =.....м	2. Расстояние от.....левого берега до уреза воды правого берега . . . . . =.....м
3. Расстояние от.....правого берега до ближайшей к урезу правого берега точки, где обнаружена поверхностная скорость (вертушкой, поплавком и т. п.) . . . . =.....м	3. Расстояние от.....левого берега до ближайшей к урезу левого берега точки, где обнаружена поверхностная скорость (вертушкой, поплавком и т. п.) . . . . =.....м
4. Величина этой скорости =.....м/сек	4. Величина этой скорости =.....м/сек
5. Расстояние от.....правого берега до ближайшей к урезу левого берега точки, где обнаруж. поверхностная скорость (вертушкой, поплавком и т. п.) . . . . . =.....м	5. Расстояние от.....левого берега до ближайшей к урезу правого берега точки, где обнаруж. поверхностная скорость (вертушкой, поплавком и т. п.) . . . . . =.....м
6. Величина этой скорости . =.....м/сек	6. Величина этой скорости . .....м/сек

Вертикаль №.....

От..... правого / левого берега..... м

Состояние погоды..... Начало наблюд. . . . . ч. м.

Сила и направление ветра ..... Конец наблюд. . . . . ч. м.

Состояние реки ..... Продолжительность наблюд. ч. м.

	Правый берег				Левый берег			
	№ свай	Отсчет по рейке	Отметка сваи	Отметка горизонта воды	№ свай	Отсчет по рейке	Отметка сваи	Отметка горизонта воды
Начальное								
Конечное								

Отметка среднего горизонта воды при работе на вертикали..... м

Показания счетчика глубин (или отсчет по тросу, штанге и пр.), когда:

1. Ось вертушки на поверхности . . . . . м
2. Низ поддона на дне . . . . . м
3. Разность отсчетов . . . . . м
4. Расстояние от оси вертушки до низа поддона . . . . . м

Глубина вертикали:

- по счетчику . . . . . H_1=..... м
- по наметке (или штанге) . H_2=..... м
- по принятому промеру живого сечения . . . . . H_3=..... м
- принятая для обработки H =..... м

Дополнительные данные зимних наблюдений

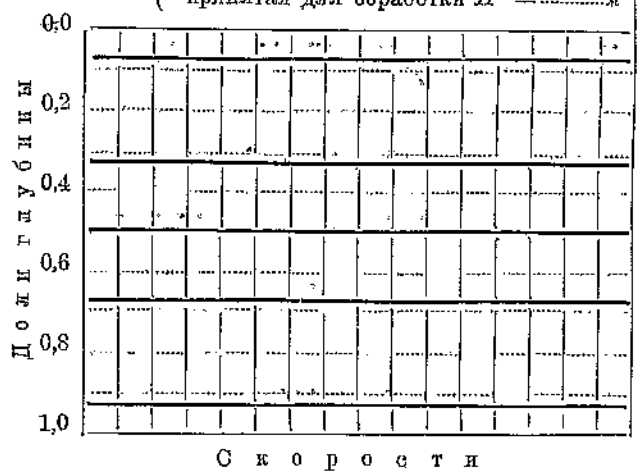
Толщина льда . . ..м

Погружение льда .....м

Погружение шуги .....м

Толщина снега . .....м

Толщина донного льда . . . .м



По способу Чебышева средняя скорость=среднее-арифметическому из отсчетов по черным ординатам кривой скоростей:

v_0=..... м/сек

Отдельные измерения или точки	Показания счетчика глубин или отсчет по тросу, штанге		Глубина опускания вертушки	Показания счетчика оборотов		Число оборотов вертушки	Показания секундомера		Продолжительность наблюдения в *сек.*	Число оборотов вертушки в секунду	Количество секунд на 100 оборотов вертушки	Скорость течения *м/сек*	Примечания
	Начальное	Конечное		Начальное	Конечное		Начальное	Конечное					
													Скорости подсчитал:

Величина средней скорости:

		Расходимость в %
1.	Из диаграммы графо-механического способа v_v = ... = ... *м/сек*	
2.	По способу Чебышева ..... v_v = ... = ... *м/сек*	
3.	„ „ Котеса $v_v = 0{,}066\,(v_0 + v_{1,0}) + 0{,}260\,(v_{0,2} + v_{0,8}) + 0{,}174\,(v_{0,4} + v_{0,6})$ ..... = ... *м/сек*	
4.	По формуле ..... $v_v = 0{,}25\,(v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8})$ ..... = ... *м/сек*	
5.	„ „ ..... $v_v = 0{,}50\,(v_{0,2} + v_{0,8})$ ..... = ... *м/сек*	
6.	„ „ ..... $v_v = v_{0,6}$ ..... = ... *м/сек*	
7.	..... = ... *м/сек*	
8.	Принята v_v = ... = ... *м/сек*	

Подсчитал

К обработке графо-механическим способом

Определение средних скоростей на вертикалях

Планиметр.....№.....*Коэфициент планим. для элем. расх.* =.....

	№ вертикали	Отсчеты по планиметру 1	2	3	Средн. разн.	Площадь диаграммы	Глубина вертикали	Средняя скорость
Нач.	1							
Кон.								
Разн.								
Нач.	2							
Кон.								
Разн.								
Нач.	3							
Кон.								
Разн.								
Нач.	4							
Кон.								
Разн.								
Нач.	5							
Кон.								
Разн.								
Нач.	6							
Кон.								
Разн.								
Нач.	7							
Кон.								
Разн.								
Нач.	8							
Кон.								
Разн.								
Нач.	9							
Кон.								
Разн.								
Нач.	10							
Кон.								
Разн.								

Определение площади живого сечения и расхода воды

Коэфициент планим. для площади ж. с...... *Коэфициент планим. для расхода*.....

	Площадь живого сечения: Отсчеты по планиметру 1	2	3	Средн.	Величина площади живого сечения $м^2$	Расход: Отсчеты по планиметру 1	2	3	Средн.	Величина расхода $м^3/сек$
Начальный										
Конечный										
Разность										

Обработал

Обработка расхода аналитическим способом

№№ вертикалей	Глубина живого сечения реки на вертикалях *м*	Средняя глубина живого сечения между вертикалями *м*	Расстояние между вертикалями *м*	Площадь живого сечения между вертикалями *м*²	Толщина ледяного покрова на вертикалях *м*	Средняя толщина льда между вертикалями *м*	Площадь ледяного покрова *м*²	Средние скорости *м/сек*		Расход *м*³/*сек*
								на вертикалях	между вертикалями	

320

У. С. С. Р.

НАРКОМЗЕМ

Отдел Мелиорации и Водного Хозяйства Упрмелиозема

Гидрометрическая Часть

Гидрологический Район

Приложение

Бланк для измерения расхода воды вертушкой *(Лицевая сторона)*

Расход №.....

Измерен.....дня.....месяца 19.....года.

Состояние погоды и реки:

Нужное подчеркнуть

Погода: ясно, пасмурно, туман, дождь, снег.

Ветер: нет, слабый, средний, сильный, весьма сильный.

Направление ветра: по течению, против, с правого берега, с левого берега.

Разрушаются берега: правый, левый, нет.

Ложе реки: скалистое, гравелистое, песчаное, плитстое, глинистое, чистое, заросшее, переменное.

Степень мутности воды: чистая, слабо мутная, средне мутная, сильно мутная, весьма мутная.

Мусор плывет: у берегов, на стрежне, мусора нет, мало, много; идет сало.

Примечания:

Бассейн реки.....Река.....

Область.....Район.....

Рабочий створ № ... ... у.....

Ближайший водомерный пост №.....

Вертушка №.....системы.....Лопасти №.....

Тарировка произведена „.....“.....19.....г. в.....

Отм. репера № 1 на правом берегу 3,316 *м* над „0“ поста.

Отм. горизонта воды на створе 2,82 *м* „ „ „

„ „ „ „ вод. посту 2,58 *м* „ „ „

Начало измер. 9 ч. 27 м. пополун.; конец измер. 2 ч. 13 м пополуд.

Нулевое деление троса отстоит от реп. № 1 на 0,00 *м* в стор. { реки / берега

Ширина живого сечения $B = 13{,}70$ *м*

Наибольшая глубина $H_{max} = 0{,}92$ *м*

Площадь живого сечения $\Omega = 7{,}298$ *м*^{2}

Число вертикалей { промерных 14 / скоростных 6 } Общее число точек 16

Расход реки $Q = 2{,}108$ *м*^{3}/*сек*

Средняя скорость $V = \frac{Q}{\Omega} = 0{,}289$ *м/сек*

Наибольшая скорость $V_{max} = 0{,}466$ *м/сек*

Подводный периметр $P = 17{,}90$ *м*, подводный радиус $R = \frac{\Omega}{P} = 0{,}407$ *м*

Отметка среднего дна 2,23 *м*, по наинизшему горизонту 2,62 *м*

Температура воды 18° Ц; температура воздуха 22° Ц

ОТДЕЛ I

Промеры

№ промерных вертикалей — расстояние от реп. № 1	Толщина льда под водою	Глубина вертикалей: Промеры I	Глубина вертикалей: Промеры II	Средняя	Средняя без толщины льда	Средняя глубина площадки	Расстояние между смежными вертикалями	Площадь между смежными вертикалями	№ скоростных вертикалей — расстояние от репера № 1	Площадь между скоростными вертикалями	№ промерных вертикалей — расстояние от реп. № 1	Толщина льда под водою	Глубина вертикалей: Промеры I	Глубина вертикалей: Промеры II	Средняя	Средняя без толщины льда	Средняя глубина площадки	Расстояние между смежными вертикалями	Площадь между смежными вертикалями	№ скоростных вертикалей — расстояние от репера № 1	Площадь между скоростными вертикалями
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4,10	Уреза	правого берега			0,00																
5,00	—	0,15	0,16	0,15		0,075	0,90	0,068	—	0,333											
6,00	—	0,37	0,39	0,38		0,265	1,00	0,266	6,00	0,895											
7,00	—	0,43	0,43	0,43		0,405	1,00	0,405	8,00	1,175											
8,00	—	0,55	0,56	0,55		0,490	1,00	0,490	10,00												
9,00	—	0,58	0,58	0,58		0,565	1,00	0,565													
10,00	—	0,63	0,65	0,64		0,610	1,00	0,610													
11,00	—	0,83	0,83	0,83		0,735	1,00	0,735													
12,00	—	0,90	0,91	0,90		0,865	1,00	0,865		1,964											
12,40	—	0,91	0,93	0,92		0,910	0,40	0,364	12,40												
13,00	—	0,81	0,82	0,81		0,865	0,60	0,519													
14,00	—	0,68	0,69	0,68		0,745	1,00	0,745													
15,00	—	0,48	0,50	0,49		0,585	1,00	0,585	15,00	1,849											
16,00	—	0,45	0,44	0,45		0,470	1,00	0,470													
17,00	—	0,44	0,42	0,43		0,440	1,00	0,440	17,00	0,910											
17,80	Уреза	левого берега			0,00	0,215	0,80	0,172		0,172											

$B = 13{,}70$ м; $\Omega = 7{,}298$ м²

$B =$ ..... м; $\Omega =$ ..... м²

Подпись измерителя расхода .....

(Оборотная сторона бланка)

№№ промерных вертикалей—расстояние от репера № 1	Глубина вертикали без толщины льда	Место измерения скорости на вертикали	Глубина погружения вертушки, считая от поверхности	Отсчеты по секундомеру при числе оборотов						Число оборотов в 1 сек.	Скорость в *м/сек*
				50	100	150	200	250	300		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4,10	0,00	Урез	правого	берега							
6,00	0,38	0,8	0,30	1′42,4″	3′24,6″	5′7,2″	—	—	—	0,49	0,144
		0,6	0,23	1′17,8″	2′35,8″	3′53 8″	—	—	—	0,64	0,178
		0,2 пов.	0,08	1′5,6″	2′11″	3′16,4″	—	—	—	0,76	0,207
8,00	0,55	0,8	0,44	56,4″	1′52,6″	2′47,2″	3′45,6″	4′39,6″	—	0,89	0,238
		0,6	0,33	43,8″	1′26,4′	2′9,6″	2′51,4″	—	—	1,17	0 346
		0,2 пов.	0,11	—	1′14,3″	—	′28,4″	—	3′43,2″	1,34	0,349
10,00	0,64	0,8	0,51	50,0″	1′40,6″	2′30,8″	3′21,2″	—	—	0,99	0,262
		0,6	0,38	—	1′18,4″	—	2′37″	—	3′55″	1,28	0,334
		0,2 пов.	0,13	—	1′3,6″	—	2′7,4″	—	3′10,2″	1,58	0,409
12,40	0,92	0,8	0,74	50,0″	1′40,4″	—	3′20″	4′10,2″	—	1,00	0,265
		0,6	0,55	—	1′16,4″	—	2′32,9″	—	3′50″	1,30	0,339
		0,2 пов.	0,18	—	58,8″	—	1′51,8″	—	2′56,4″	1,70	0,437

Отдел III Вычисление расхода				Отдел IV Определение горизонта воды на створе		
Средняя скорость		Площадь между скоростными вертикалями	Расход интервала между скоростными вертикалями q	Отметка горизонта a_n	При резком изменении горизонта	
На вертикали	Для интервала между вертикалями				Средняя отметка $a = \frac{a_n + a_{n+1}}{2}$	Произведение средней отм. на соотв. расход $= qa$
13	14	15	16	17	18	19
0,000						
0,177	0,089	0,333	0,030	2,83		
0,300	0,238	0,895	0,213	2,83		
0,335	0,317	1,175	0,372	2,82		
0,346	0,340	1,964	0,668	2,82		

															0,333	1,849	0,616	
15,00	0,49	0,8 0,6 0,2 пов.	0,39 0,23 0,10	44,1″ 41,4″ —	1′28,4″ 1′22,6″ 1′15,2″	— — —	2′51″ 2′45,2″ 2′30,6″	— — —	4′25,4″ 4′7,8″ —	1,13 1,21 1,33	0,297 0,316 0,346	0,319				2,82		
17,00	0,43	0,8 0,6 0,2 пов.	0,34 0,26 0,08	2′6″	4′23,2″	6′34,6″	—	—	—	0,38	0,120	0,120	0,219	0,910	0,199			
17,80	0,00	0,8 0,6 0,2 пов.	Урез	левого	берега							0,000	0,030	0,172	0,010	2,82		
		0,8 0,6 0,2 пов.																
		0,8 0,6 0,2 пов.																
		0,8 0,6 0,2 пов.																

Расход $Q = 2{,}108$ *м³/сек*. Сумма $\Sigma qa =$ _____

Отм. гор. $H = \dfrac{\Sigma qa}{Q} = 2{,}82$

Подпись вычисляющего расход.....

Подпись поверяющего.....

Годовая таблица уровней (в *см*) и расходов (в $м^3/сек$) за 1925 год (гидрологический)

Дни	Октябрь		Ноябрь		Декабрь		Январь		Февраль		Март		Апрель		Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	H	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*
1	111	438	108	428	104	415	104	415	88	362	76	328	101	405	160	633	379	1880	213	895	176	704	92	375
2	113	445	107	424	105	418	102	408	87	359	75	325	98	395	152	599	361	1770	119	928	182	733	92	375
3	116	457	110	434	106	421	103	412	86	356	75	325	98	395	146	573	320	1510	218	923	179	718	93	378
4	116	457	108	428	106	421	105	418	81	311	76	328	98	395	143	560	279	1260	205	852	172	685	91	371
5	116	457	106	421	105	418	105	418	79	335	75	325	98	395	141	551	253	1110	197	810	162	642	90	368
6	115	453	105	418	104	415	102	408	78	333	75	325	98	395	138	539	240	1040	196	805	155	612	88	362
7	115	453	104	415	104	415	97	392	81	341	76	328	99	399	136	531	226	956	197	810	148	581	88	362
8	113	445	104	415	104	415	97	392	80	338	76	328	99	399	133	520	211	884	202	836	141	551	86	356
9	111	438	104	415	104	415	95	385	79	335	76	328	98	395	130	508	198	815	206	857	134	524	86	356
10	112	442	103	412	104	415	91	371	77	330	77	330	96	388	128	501	188	764	204	846	129	504	86	356
11	112	442	102	408	102	408	89	365	74	329	79	335	103	412	126	494	188	764	212	889	124	486	84	350
12	115	453	101	405	99	399	87	359	75	325	79	335	111	438	126	494	207	862	220	934	119	468	83	347
13	113	445	103	412	96	388	88	362	77	330	78	333	110	434	129	504	226	966	210	878	122	479	82	344
14	115	453	102	408	95	385	90	368	79	335	79	335	107	424	132	516	238	1029	202	836	126	495	83	347
15	112	442	105	418	94	382	92	375	77	330	82	344	106	421	135	528	237	1024	192	784	128	501	84	350
16	112	442	105	416	96	388	92	375	79	335	84	350	104	415	138	539	243	1058	181	728	122	479	84	350
17	114	449	105	418	96	388	89	365	80	338	85	353	104	415	130	508	267	1190	177	709	114	449	82	344
18	114	449	112	442	94	382	90	368	82	344	85	353	106	421	120	472	293	1350	175	700	108	428	81	341
19	112	442	112	442	94	382	87	359	82	344	87	359	109	431	114	449	313	1470	172	685	105	418	81	341
20	111	438	116	457	92	375	82	344	80	338	95	385	120	472	109	431	307	1430	164	650	104	415	80	338
21	110	434	114	449	93	378	80	338	79	335	94	382	136	531	110	434	281	1280	154	607	103	412	79	335
22	110	434	109	431	90	368	79	335	77	330	98	395	161	637	115	453	264	1170	148	581	100	402	78	333
23	109	431	106	421	90	368	75	355	76	328	98	395	199	820	152	599	243	1060	148	581	98	395	76	328
24	109	431	101	405	92	375	80	338	76	328	90	368	178	714	206	857	228	976	151	594	97	392	74	322
25	109	431	100	402	95	385	83	347	76	328	98	395	166	659	227	971	217	917	152	599	95	385	79	335
26	107	424	99	399	98	395	83	347	77	330	95	385	168	667	233	1000	214	900	149	586	94	382	76	328
27	106	421	100	402	104	415	79	335	76	328	111	438	185	748	253	1110	219	928	146	573	94	381	76	328
28	106	421	101	405	107	424	72	317	76	328	118	464	177	709	295	1360	218	923	148	581	91	371	77	330
29	106	421	102	408	108	428	82	344	—	—	111	438	173	690	331	1530	210	878	150	590	89	365	76	328
30	107	424	102	408	107	424	88	362	—	—	105	418	166	659	354	1720	209	873	156	616	87	359	77	330
31	106	421	—	—	105	418	88	362	—	—	102	408	—	—	374	1850	—	—	165	654	89	365	—	—

Минимум	*H,Q*	105	418	99	399	90	368	66	302	74	322	75	325	96	388	108	428	186	754	146	573	87	359	73	320
	день	29	—	26	—	23	—	28	—	11	—	9	—	10	—	21	—	10	—	27	—	30	—	24	—
Среднее		111	440	105	419	100	401	90	368	79	336	87	363	126	503	171	722	249	1102	182	739	122	486	83	347
Максимум	*H,Q*	116	547	116	457	108	438	105	418	92	375	119	468	202	836	377	1870	382	1900	210	934	184	743	93	378
	день	5	—	20	—	28	—	4	—	1	—	28	—	23	—	31	—	1	—	3	—	2	—	3	—

Невегетационный период с 1/X по 31/III						Вегетационный период с 1/IV по 30/IX						Г о д					
Минимум		Среднее		Максимум		Минимум		Среднее		Максимум		Минимум		Среднее		Максимум	
H	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*	*H*	*Q*
66	302	95	388	119	468	73	320	155,5	650	382	1900	66	302	125	519	322	1900

Отметка нуля 294,004 м

Наблюдения над уровнем 3 раза в день.

Средне-Азиатский Опытно-Исследовательский Институт Водного Хозяйства

Гидрометрическая часть

Журнал работ по учету наносов

(весовым способом)

Гидрометрический район _____

Река _____ станция, пост _____ № _____

Год 19____ месяц _____ число ____

№ расхода _____ (при котором брались пробы)

Пробы воды брал _____

Вычислял _____

Проверял _____

(2-я стр. журнала)

№№ по порядку	№№ вертикалей	Расст. от уреза воды $\frac{\text{прав.}}{\text{лев.}}$ берега и между вертикалями в *м*	Глубина вертикали *H м*	Глубина взятия пробы и измер. скорости в *м*	Скорость в *м/сек*		Элем. расход воды $v_v \cdot H$ *м²/сек*
					Скорость в точке взятия пробы *v м/сек*	Ср. скорость на вертикали v_v *м/сек*	

(3-ья стр. журнала)

№№ бутылок	Мутность						Расх. наносов через вертикаль			Примечания
	Объем взятой пробы воды в *см³*	Количество мути в пробе в *г*	Относительная мутность *a* в *г/л* (=*кг/м³*)	Средняя мутность на вертик. a_v *кг/м³*	Глубина, соответств. средней мутности на вертик., в долях *H*	Элем. расход наносов в точке av *кг/м²/сек*	Точно		Приближ.	
							Элем. расход наносов через вертикаль Q_{vv} *кг/м/сек*	Средний элем. расход наносов по вертик. $\frac{Q_{vv}}{H}$ *кг/м²/сек*	Элем. расход наносов через вертикаль $a_v H \cdot v_v$ *кг/м/сек*	

Средне-Азиатский Опытно-Исследовательский Институт Водного Хозяйства

Гидрометрическая часть

Журнал учета наносов

(объемным способом)

Район_____ Станция, пост_____

Река_____ Год_____

№ опыта	Время собирания пробы воды: Месяц	Число: от	Число: до	Вода: Приблизительный объем пробы	Вода: № бутыли	Вода: Высота воды в бутыли	Вода: Точный объем пробы q см³	Вода: Средний за декаду расход воды $Q_{ср.} = \frac{\Sigma Q}{10}$ м³/сек	Наносы: № мензурки	Наносы: Объем уплотнившегося осадка s см³	Наносы: Относительное содержание наносов в % $x = \frac{s}{q} 100$	Наносы: Средний за декаду расход наносов $q_s = \frac{x Q_{ср.}}{100}$ м³/сек	Примечания

328
Наблюдатель
Ташкент, 92, ул. Ста...

БИБЛИОТЕКА
Белорусского Политехнического
ИНСТИТУТА
Инв. № 92713

дня 19 г.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
15	10 снизу	*биржевыми*	*баржевыми*	типогр.
127	7 »	-(99)	(96)	»
257	21 »	*данных*	*донных*	»
287	3 »	*Цвет*	*Цвет*	»

Зак. 2281. П. А. Гириллович, Гидрометрия.